



Contrôle de l'apparence des matériaux anisotropes

Boris Raymond

► To cite this version:

Boris Raymond. Contrôle de l'apparence des matériaux anisotropes. Autre [cs.OH]. Université de Bordeaux, 2016. Français. NNT : 2016BORD0142 . tel-01387867

HAL Id: tel-01387867

<https://theses.hal.science/tel-01387867>

Submitted on 26 Oct 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE

PRÉSENTÉE À

L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

ÉCOLE DOCTORALE DE MATHÉMATIQUES ET
D'INFORMATIQUE

par **Boris Raymond**

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : INFORMATIQUE

Contrôle de l'apparence des matériaux anisotropes

Date de soutenance : 19 septembre 2016

Devant la commission d'examen composée de :

Adrien BOUSSEAU ...	Docteur, Inria ...	Rapporteur
Nicolas HOLZSCHUCH	Docteur, Inria ...	Rapporteur
Mathias PAULIN	Professeur, IRIT	Président
Pascal BARLA	Docteur, Inria ...	Encadrant
Gaël GUENNEBAUD .	Docteur, Inria ...	Encadrant
Xavier GRANIER	Professeur, IOGS	Directeur

– 2016 –

Résumé

En informatique graphique, le rendu des matériaux occupe une place très importante dans la qualité de l'image finale. De nombreux modèles ont contribué à améliorer l'apparence des matériaux. Aujourd'hui, certains matériaux restent encore difficiles à représenter à cause de leur complexité. Parmi ceux-ci, la famille des matériaux *anisotropes* reste peu étudiée et complexe. Dans cette thèse nous proposons une meilleure compréhension des matériaux anisotropes au travers d'un modèle pour les représenter ainsi qu'un outil permettant de mieux en contrôler l'apparence.

Notre modèle de matériaux brossés ou rayés se base sur la simulation du transport lumineux au sein de la micro-géométrie d'une rayure pour restituer tous les détails en conservant des temps de rendus suffisamment courts pour rendre la scène de manière interactive.

Notre outil d'édition des reflets anisotropes utilise le champ d'orientation des BRDF pour donner à l'utilisateur l'impression de dessiner ou de déformer des reflets directement sur l'objet.

Title Control of anisotropic materials appearance.

Abstract

In computer graphics, material appearance is a fundamental component of the final image quality. Many models have contributed to improve material appearance. Today, some materials remains hard to represent because of their complexity. Among them, anisotropic materials are especially complex and little studied. In this thesis, we propose a better comprehension of anisotropic materials providing a representation model and an editing tool to control their appearance.

Our scratched material model is based on a light transport simulation in the micro-geometry of a scratch, preserves all the details and keeps an interactive rendering time.

Our anisotropic reflections edition tool uses BRDF orientation fields to give the user the impression to draw or deform reflections directly on the surface.

Keywords Computer Graphics, Rendering, Material appearance, Real-Time

Mots-clés Informatique graphique, Rendu, Apparence des matériaux, Rendu temps-réel

Laboratoire d'accueil LaBRI

Remerciements

J'aimerais tout d'abord remercier *Adrien Bousseau* et *Nicolas Holzschuch* qui ont accepté d'être les rapporteurs de ma thèse et aussi Mathias Paulin qui a accepté de présider mon jury. Je tiens également à remercier les membres de l'équipe projet Manao qui m'ont accueilli pendant toute la durée de mon doctorat ainsi que les membres de l'équipe projet Monc qui m'ont laissé du temps libre afin que je puisse finir ma rédaction de thèse dans les bonnes conditions. Plus spécifiquement, j'aimerais remercier *Romain Pacanowski*, *Simon Boye*, *Pierre Bénard*, *Laurent Belcour*, *Patrick Reuter*, *Nicolas Mellado* et *Romain Vergne* pour l'aide qu'ils m'ont fournie dans mes travaux de recherche et d'écriture. Je souhaite également remercier *Anne-Laure*, mon assistante d'équipe qui sait s'occuper des allers-retours à la paperasse tels que moi et qui m'a aidé dans mes démarches administratives avec patience. Cette thèse n'aurait pas pu exister sans le soutien de *Xavier Granier*, mon directeur de thèse qui m'a donné les moyens de faire mon doctorat dans les meilleures conditions possibles. Enfin, il est très important pour moi de remercier mes deux encadrants de thèse, *Pascal Barla* et *Gaël Guennebaud* qui ont toujours été là, à m'entraîner systématiquement vers le haut. Je souhaite ici saluer leur patience, leur pédagogie et surtout souligner le respect que j'ai pour eux en tant que chercheurs mais aussi en tant que personnes car c'est avant tout grâce à eux que mon doctorat a été une bonne expérience.

Comme pour beaucoup de monde, mon doctorat n'a pas été de tout repos et j'aimerais remercier mes collègues avec qui j'ai pu me détendre lors de nombreux repas et pauses à échanger dans la bonne humeur sur de nombreux sujets. Je souhaite également remercier ma famille pour le soutien qu'ils m'ont apporté et je ne désespère pas de réussir un jour à leur faire comprendre en quoi consiste ma thèse. Je tiens également à remercier mes amis, qui se reconnaîtront à coup sûr, pour être là, toujours aussi aimables même lorsque je suis insupportable. Enfin, je remercie ma collègue, amie et compagne *Cynthia* qui a eu la lourde tâche de me supporter pendant toute la durée de la thèse mais également de corriger ma grammaire catastrophique.

Bébés de la thèse : *Owen*, *Maya*, *Théo*, *June*, *Lise*, *Tom*, *Léon*, *Arthur*.

Table des matières

Table des matières	vii
1 Introduction	1
1.1 Contexte de l'étude et motivations	1
1.2 Contribution et organisation de la thèse	9
2 État de l'art	11
2.1 Prérequis	11
2.1.1 Notations	11
2.1.2 Équation du rendu	12
2.1.3 BRDF infinitésimale	13
2.1.4 Monte-Carlo et échantillonnage préférentiel de la BRDF	14
2.2 Modèles de matériaux	15
2.2.1 Matériaux homogènes	16
2.2.2 Apparence multi-échelles	21
2.3 Contrôle de l'apparence	28
2.3.1 Approche directe	28
2.3.2 Approche inverse	30
3 SV-BRDF multi-échelles pour l'apparence des matériaux bro-	37
sés	
3.1 Aperçu de notre approche	39
3.2 Modèle de matériau	40
3.2.1 BRDF Miroir	41
3.2.2 BRDF Complète	43
3.2.3 SV-BRDF	48
3.3 Utilisation du modèle	49
3.3.1 Échantillonnage préférentiel	49
3.3.2 Sources lumineuses	50
3.3.3 Détails d'implémentation	51
3.4 Résultats	54
3.4.1 Édition interactive des matériaux	54
3.4.2 Résultats avec éclairage global	58

3.5	Discussions	62
3.5.1	Intersections de rayures	62
3.5.2	Vue proche	65
3.5.3	Modification de la micro-BRDF	68
3.5.4	Création des motifs de la SV-BRDF	69
3.5.5	Comparaisons	71
4	Optimisation de l'orientation des BRDF pour la manipulation des reflets anisotropes	73
4.1	La forme des reflets anisotropes	74
4.1.1	La théorie des micro-facettes	74
4.1.2	Analyse différentielle	75
4.2	Orientation de la BRDF en fonction des tangentes spéculaires	79
4.2.1	Représentation angulaire	79
4.2.2	Configuration discrète	80
4.2.3	Optimisation non-linéaire	82
4.2.4	BRDF symétrique	83
4.3	Outils de manipulation des reflets	84
4.4	Performances et résultats additionnels	87
4.5	Discussions	88
4.5.1	Éviter les singularités	88
4.5.2	Création d'un outil de dessin direct du reflet	90
5	Perspectives	93
5.1	Lien entre l'apparence et la géométrie	93
5.1.1	Intuitions sur l'image de la BRDF d'une rayure simple	93
5.1.2	Profils plus complexes	96
5.1.3	Édition dans l'espace de la BRDF	97
5.1.4	Approche analytique	98
5.1.5	Réutilisation de l'approche	98
5.1.6	Extension de l'outil d'édition de l'apparence	100
5.2	Hypothèses multi-échelles	100
5.2.1	Courbures de la surface	100
5.2.2	Courbure géodésique et divergence des rayures	101
5.2.3	Variations locales de la vue et de la lumière	102
5.3	Fabrication	103
6	Conclusion	105
	Bibliographie	107

Chapitre 1

Introduction

1.1 Contexte de l'étude et motivations

En informatique graphique, la synthèse d'images est le domaine qui rassemble tous les outils et méthodes permettant de produire des images à partir d'une représentation numérique d'une scène 3D. Les images de synthèse sont aujourd'hui utilisées dans de nombreux domaines tels que la visualisation de données pour la science, la conception assistée par ordinateur et surtout le divertissement.

Les films utilisent des outils de synthèse d'images toujours plus perfectionnés pour remplacer de coûteux effets spéciaux matériels par des images numériques toujours plus réalistes. D'autre part certains films d'animations sont entièrement générés par ordinateur et ne se contentent plus d'imiter la réalité, ils permettent également d'obtenir des visions plus artistiques. Le jeu vidéo et de manière générale le rendu interactif et temps réel imposent des contraintes calculatoires très fortes. Pour que l'utilisateur puisse interagir efficacement avec la scène, l'ordinateur doit être capable de fournir plusieurs images par seconde. Les joueurs évoluent dans des mondes dynamiques potentiellement très grands imposant de fortes contraintes sur les ressources nécessaires. Que ce soit les jeux vidéo ou les films, le budget de temps pour calculer une image est limité. La recherche de solutions efficaces est l'élément centrale de tous les travaux de recherche en synthèse d'images.

La qualité du rendu se fait sur la richesse de l'apparence obtenue, qu'elle soit plus ou moins réaliste (voir figure 1.1). Suivant les applications, une sous-partie de la recherche en synthèse d'images s'est orientée vers la création de contenu physiquement plausible ou au moins photo-réaliste. L'objectif de la synthèse d'images photo-réalistes correspond alors à obtenir une image à partir de la simulation physique du transport lumineux dans une scène réaliste décrite fidèlement.



FIGURE 1.1 – Même si le contenu de la scène n'est pas complètement vraisemblable, l'apparence est riche et réaliste. (Image tirée du jeu *Horizon Zero Dawn*)

Le niveau de réalisme obtenu par synthèse d'images dépend de deux éléments principaux :

- L'algorithme de synthèse d'images utilisé en accord avec les lois physiques liées au comportement de la lumière.
- La richesse des détails de la scène 3D.

Calculer une image revient à calculer l'interaction entre les trois différents composants de la scène : la description des sources de *lumière*, la *géométrie* des objets présents et les *matériaux* à la surface de chacun de ces objets. Pour cela, il existe de nombreux algorithmes, que nous pouvons néanmoins séparer en deux familles. Les algorithmes de rendu temps-réel ou interactifs sont conçus pour calculer les images suffisamment rapidement pour permettre à l'utilisateur de se déplacer ou d'interagir dans la scène. Lorsque le temps de rendu n'est pas aussi contraint, il est possible de pousser d'avantage le réalisme à l'aide d'algorithmes de rendu différé. Habituellement, des algorithmes de rasterisation sont utilisés pour des rendus temps réels tandis que des algorithmes basés sur le lancer de rayons sont utilisés pour les rendus différés.

La qualité des sources de lumière est essentielle pour l'apparence. Les modèles de représentations des lumières que nous utilisons sont aujourd'hui bien maîtrisés avec des modèles analytiques pour les cas idéalisés et des modèles tabulés plus riches et souvent obtenues à partir de mesures. Nous nous concentrons néanmoins sur les problématiques liées à la représentation de la géométrie et des matériaux.

Pour décrire une scène 3D, il est avant tout nécessaire de détailler la forme des objets qui la composent. Bien que de nombreuses méthodes existent aujourd’hui pour représenter, ou du moins approcher la géométrie, les *maillages triangulaires* sont majoritairement utilisés. Cette utilisation massive pour le rendu s’explique de plusieurs façons :

- Le triangle est l’élément surfacique le plus simple.
- Il permet d’approcher n’importe quelle surface.
- Il est possible de contrôler facilement le degré d’approximation en fonction du nombre de triangles utilisés.
- Les cartes graphiques exploitent la facilité de rasterisation des triangles pour offrir une accélération matérielle importante.

Le matériau est le troisième élément qui compose la scène, il a un impact essentiel sur l’apparence finale et il constitue l’intérêt principal de notre étude. Il représente le lien qui existe entre la lumière et la géométrie. Dans une scène 3D, chaque objet doit posséder un matériau. Ce matériau permet de décrire le comportement que la lumière doit adopter lorsqu’elle rebondit contre cet objet. Les différents comportements entraînent des reflets différents qui changent l’apparence d’un objet et nous permettent d’obtenir des indices visuels sur la matière dont il est composé [Ade01]. Par exemple, un objet en métal a des reflets très nets alors qu’à l’inverse, une feuille de papier apparaît mate. De manière plus générale, lorsqu’un objet apparaît brillant, la lumière renvoyée par la surface est concentrée autour de la direction de réflexion miroir, nous pouvons dire que le matériau est spéculaire. À l’inverse, lorsque la lumière est renvoyée uniformément dans toutes les directions, l’objet va apparaître mat et le matériau est dit diffus. Ces deux cas représentent bien sûr les deux extrêmes simplifiés d’une gamme très sophistiquée de matériaux.

Micro-géométrie et matériaux structurés

Le matériau est lié aux propriétés intrinsèques de la matière qui compose l’objet. Il détermine la quantité de lumière qui est absorbée, réfléchie ou diffusée. Mais ces propriétés ne suffisent pas pour caractériser efficacement les matériaux tels que nous les percevons. Il existe une *micro-géométrie* à la surface de l’objet qui est suffisamment petite pour ne pas être distinguée mais qui a un impact important sur l’apparence. Les matériaux sont donc définis à cette échelle microscopique fixée. À une échelle inférieure, les variations géométriques entrent dans l’ordre de grandeur de la longueur d’onde de la lumière visible et provoquent des phénomènes spectraux plus complexes à représenter comme la diffraction. À une échelle supérieure, la géométrie commence à pouvoir être distinguée à l’œil nu et nécessite alors une représentation explicite de la forme.

Parmi tous les matériaux, nous considérons structurés tous ceux basés sur

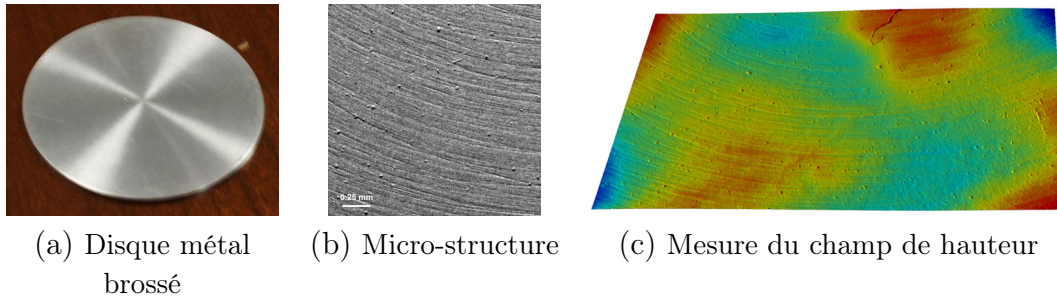


FIGURE 1.2 – (a) De part son brossage circulaire, ce disque présente (b) une micro-géométrie qui est orientée dans une direction privilégiée basée sur la direction locale du brossage. (c) La visualisation du champ de hauteur permet de mieux voir la micro-géométrie.

l'idée d'un motif primitif qui se retrouve répété sur la surface d'un objet. En plus de la forme de la primitive elle-même, l'apparence du matériau dépend également de son motif de positionnement. En imaginant une surface recouverte de cratères, nous pouvons différencier la disposition irrégulière de cratères de tailles très variables à la surface de la lune et celle au contraire très régulière des cratères quasiment identiques répartis sur une balle de golf.

Apparence des matériaux structurés L'apparence des matériaux structurés peut être caractérisée par un modèle de matériau homogène si les micro-structures apparaissent tellement petites que leur réponse à l'éclairement ne permet pas de les distinguer. Plusieurs travaux [BNH10, IM12, DWMG15] reposent sur l'utilisation d'une primitive pour prédire l'apparence du matériau homogène correspondant. Néanmoins, les primitives sont souvent trop larges à l'échelle où elles apparaissent pour qu'un modèle de représentation homogène suffise. Lorsque c'est le cas, il est possible d'utiliser une représentation géométrique explicite où la répétition du motif inclut une redondance dans les données. Pour de nombreux matériaux comme les tissus ou la fourrure, la taille des primitives est problématique car les motifs sont suffisamment petits pour être très nombreux mais également suffisamment gros pour rester discernables. Par exemple, un satin vu de loin va présenter des reflets anisotropes mais les fibres deviennent rapidement discernables à mesure que le point de vue se rapproche et donnent alors une impression de texture à la surface.

Les matériaux anisotropes

Direction principale de la micro-géométrie Il existe de nombreux matériaux que nous pouvons classer en plusieurs familles. Un matériau *isotrope* est un cas particulier de matériau dont les propriétés de réflexion ne varient pas en fonction de l'orientation du repère tangent à la surface de l'objet. Un cas très



FIGURE 1.3 – Les reflets du matériau (a) initialement isotrope (b) commencent à s’étirer lorsque l’anisotropie augmente (c) jusqu’à former des lignes de reflets. Dans la dernière image, à gauche de la sphère centrale, une boucle de lumière apparaît.

simple de matériau isotrope est le miroir qui conserve les mêmes reflets lorsqu’il tourne sur lui-même. A l’inverse, la définition rigoureuse de l’*anisotropie* correspond au cas où le comportement change en fonction de la direction. Or, dans cette thèse nous définissons un matériau comme anisotrope seulement dans le cas particulier où sa micro-géométrie privilégie *une direction principale*. La figure 1.2 montre l’exemple d’un reflet anisotrope ainsi que des mesures de la micro-surface d’un échantillon de ce matériau. Ce matériau anisotrope est brossé dans une direction principale qui va déterminer la nature particulière des réflexions.

Reflets dus à l’anisotropie A l’inverse des objets brillants ou mats isotropes, les reflets de ces matériaux ne sont pas simplement déformés par la forme de l’objet. Ils ont tendance à être étirés dans une ou plusieurs directions principales. L’anisotropie d’un matériau n’est pas binaire et les matériaux sont plus ou moins anisotropes (voir figure 1.3). De nombreux éléments influent sur l’anisotropie et peuvent alors suivant les cas subtilement déformer le reflet, ou bien le métamorphoser en créant des reflets très allongés ressemblant plus à des lignes de reflet.

Impact de l’anisotropie sur l’apparence Les matériaux anisotropes se retrouvent dans notre environnement sous de nombreuses formes. Il est possible de rencontrer des matériaux anisotropes dans la nature. Présent sur les pétales de certaines fleurs comme les coquelicots, sur une chevelure brillante ou sur une fourrure courte ou mouillée, ils correspondent souvent au résultat de la croissance d’un amas d’éléments initialement fibreux qui seront à l’origine de l’orientation principale de la micro-géométrie. Les reflets anisotropes les plus évidents se trouvent néanmoins dans les objets créés par l’homme. Le

procédé d'usinage des pièces métalliques produit souvent des micro-rayures qui produisent des reflets anisotropes. Récemment, les imprimantes 3D avec leur routine de fabrication par couches produisent des objets qui ont des reflets anisotropes. Les tissus brillants sont également très anisotropes, les directions orthogonales de la maille fournissent une apparence très complexe que la communauté scientifique continue d'étudier.

L'apparence d'un objet est influencée par son matériau mais aussi par sa forme. Dans le cas des reflets isotropes, ce lien déjà complexe va changer la forme des réflexions en fonction des courbures de la surface de l'objet. Lorsque le matériau est anisotrope, les courbures de la surface ne sont alors plus les seuls paramètres de forme qui ont une influence sur le reflet. Comme ces matériaux dépendent d'une ou plusieurs orientations privilégiées, cette orientation et ses variations ont une influence supplémentaire. La déformation la plus évidente des reflets sera de les voir courber sous l'effet des différents paramètres. Cependant, l'apparence des matériaux anisotropes est très difficile à prédire, ses reflets pouvant même apparaître sous la forme de boucles de lumière (voir figure 1.3 (c)).

Au delà des apparitions naturelles de l'anisotropie dans les matériaux, certains créateurs ont profité de la complexité des reflets pour montrer qu'il est possible de l'utiliser pour jouer sur la perception humaine [Pra16]. En produisant une courbe spéculaire fine et verticale, les collants possèdent une maille particulièrement étudiée permettant d'augmenter l'impression de courbure de la jambe et donc de finesse amplifiée (voir figure 1.4 (a)). Une impression de relief peut aussi être ajoutée en faisant varier les orientations rapidement sur une surface. Sur les tables de bars (voir figure 1.4 (b)), le brossage circulaire rajoute un motif à la surface qui brouille les pistes utilisées habituellement pour percevoir les différents paramètres de l'apparence en donnant l'illusion d'un relief sous-jacent (voir figure 1.4 (c)). Comme l'apparence dépend du matériau, de la géométrie mais aussi de la lumière, l'ambiguïté de l'anisotropie peut aussi être utilisée pour nous tromper sur l'éclairage. Le reflet d'une source de lumière ponctuelle peut être déformé jusqu'à devenir une ligne, qui dans un contexte approprié, pourra nous faire penser à un éclairage utilisant un néon.

L'apparence des matériaux anisotropes reste à ce jour très difficile à contrôler. Nous proposons dans le chapitre 4 des outils de contrôle de la forme du reflet qui s'appuie sur la compréhension des liens entre la géométrie, le matériau et l'apparence des reflets.

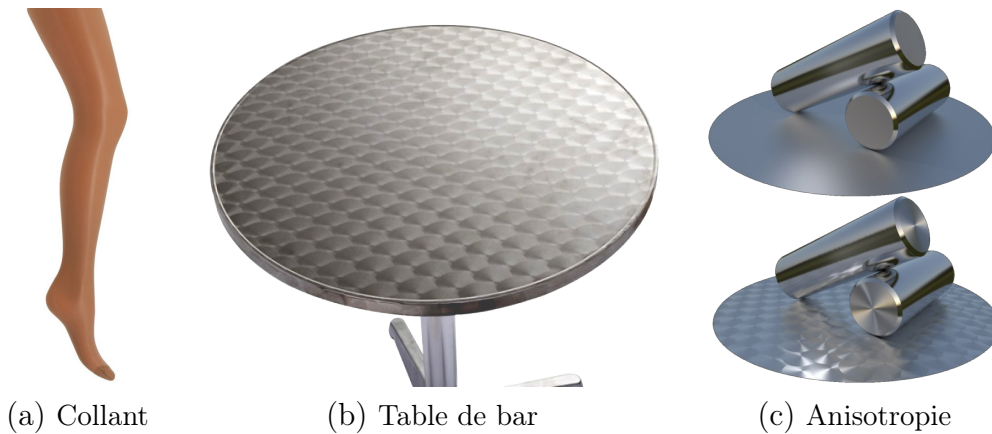


FIGURE 1.4 – (a) Causée par l’anisotropie, la ligne lumineuse le long de la jambe affine la forme en augmentant l’impression de courbure. (b) Les tables de bars en aluminium possèdent des motifs circulaires donnant une impression de forme à la surface. (c) Ajouter ces motifs augmente considérablement la richesse de l’apparence.

Les rayures

Puisque les rayures sont des primitives unidimensionnelles, ce sont des structures qui impliquent une direction principale. Les matériaux basés sur des surfaces recouvertes de micro-rayures correspondent donc à notre définition des matériaux anisotropes. L’apparence à très petite échelle est la même que le matériau soit brossé dans une unique direction ou rayé de manière sporadique dans toutes les directions ; elle correspond à l’apparence d’une rayure (voir figure 1.5 (a)). La disposition, la fréquence et la régularité des rayures influencent l’apparence dès le moment où plusieurs rayures sont visibles simultanément (voir figure 1.5 (b)). A mesure que le point de vue s’éloigne, l’apparence des matériaux brossés converge vers l’apparence d’un matériau anisotrope dont la complexité dépend du profil des rayures. Suivant la taille des rayures, pour qu’un matériau brossé paraisse homogène, le point de vue doit bien souvent être très éloigné (voir figure 1.5 (c)). L’étape de transition entre la représentation véritable de la rayure et son apparence homogène est alors cruciale pour le réalisme dans de nombreux cas de figure. Lorsque le matériau est rayé, les rayures sont plus espacées et s’orientent dans toutes les directions. L’apparence homogène nécessite alors un point de vue encore plus éloigné pour émerger. Cette représentation homogène peut alors être très anisotrope si le nombre de directions de rayures est très faible ou bien isotrope si les nombreuses rayures occupent uniformément et continûment toutes les orientations possibles.

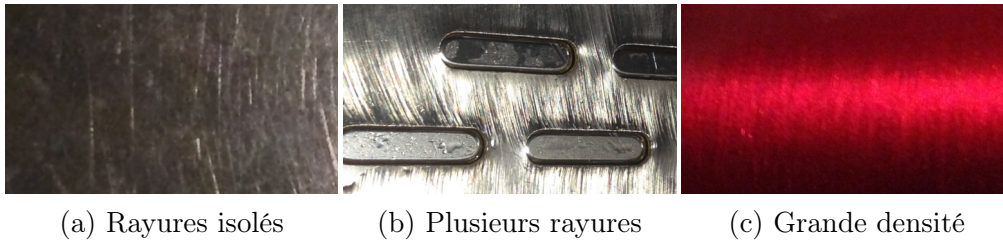


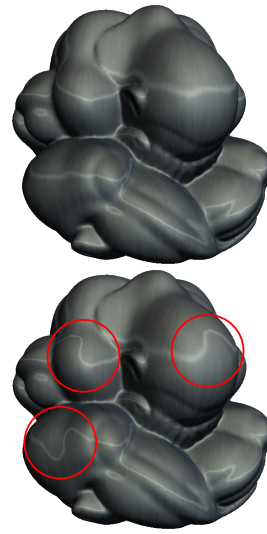
FIGURE 1.5 – (a) Vu de près, le reflet fourni par une seule rayure n'est pas étiré.(b) Lorsque la rayure se répète, les reflets s'alignent et à mesure que (c) la densité des rayures augmente, une ligne de réflexion apparaît.

Échelle des matériaux

L'impact de la micro-géométrie sur l'apparence des matériaux est souvent abordé en considérant l'échelle de manière fixe. Or, dans l'image, cette notion d'échelle n'est pas absolue car elle dépend de la distance du point de vue à l'objet. Par exemple, en synthèse d'images il est possible de concevoir un point de vue qui se rapprocherait, passant de la vue à l'échelle humaine à une vue microscopique de manière continue [LEV99]. A l'inverse, nous avons appelé micro-géométrie, la géométrie qui n'est pas visible à l'oeil nu. Si le point de vue est suffisamment éloigné, une échelle plus grande peut être encapsulée dans cette même caractéristique. Par exemple, les vagues présentes sur une étendue d'eau sont visibles depuis un bateau qui navigue dessus mais deviennent juste un facteur indirect de l'apparence lorsqu'elles sont vues par le passager d'un avion qui vole loin au-dessus. La synthèse d'images doit donc permettre une échelle dynamique appropriée. A une échelle donnée, si la micro-géométrie ne peut pas être distinguée, nous pouvons dire que le matériau est *homogène*. Si la micro-géométrie commence à apparaître, le matériau est *hétérogène*.

Géométrie et matériaux en synthèse d'images Cette échelle dynamique est d'autant plus utile quelle permet de séparer les éléments de l'apparence qui sont représentés par la géométrie de ceux qui le sont par le matériau [BN11]. Comme nous l'avons vu précédemment, les ressources nécessaires au stockage et au rendu de la scène 3D sont en quantité limitée. La problématique principale est alors de trouver la bonne représentation de matériau à la bonne échelle. Si l'échelle est trop petite, il faut alors plus de calculs pour éviter d'avoir du bruit tandis qu'une échelle trop grande entraîne une perte de détails.

Les matériaux les plus complexes tel que les matériaux brossés sont encore mal représentés à l'échelle intermédiaire où leur apparence est la plus riche. Dans le chapitre 3, nous présentons un modèle d'apparence de ces matériaux qui respecte les contraintes d'efficacité sans altérer la qualité de l'apparence finale.



(a) Apparence des matériaux structurés (b) Direction d'anisotropie

FIGURE 1.6 – (a) A partir des profils et de la disposition des rayures, nous fournissons une représentation efficace et physiquement plausible d'un matériau rayé ou brossé. (b) Nos outils d'éditions des reflets permettent de modifier directement leur apparence en agissant seulement sur les directions d'anisotropies.

1.2 Contribution et organisation de la thèse

Bien que l'étude et l'utilisation des propriétés des matériaux anisotropes soient les objectifs généraux de la thèse, nous basons également une partie de nos travaux sur l'apparence des matériaux composés de primitives unidimensionnelles telles que les rayures. Dans ce mémoire de thèse, nous proposons à la fois une représentation et une méthode de contrôle de l'apparence des matériaux anisotropes à deux échelles différentes résumées dans la figure 1.6. Les méthodes que nous proposons s'inscrivent dans l'optique d'améliorer la représentation et le contrôle des matériaux anisotropes complexes afin de pouvoir les utiliser pour augmenter le réalisme des scènes 3D. Nos outils sont intégrés dans des moteurs de rendu temps réel pour montrer les performances qu'ils permettent d'obtenir. Afin de montrer qu'elles pouvaient être intégrées dans la majorité des pipelines graphiques et pour obtenir des résultats en éclairage global, nos méthodes ont également été implémentées dans des moteurs de rendu photo-réaliste. Les deux outils que nous proposons correspondent aux chapitres 3 et 4 de ce mémoire de thèse :

Chapitre 3 : Modèle de matériaux rayés. L'objectif de ce chapitre est de proposer un modèle d'apparence multi-échelle des matériaux structurés. Nous introduisons un modèle de matériau spécifique pour la représentation

spatiale et multi-échelle des matériaux brossés et rayés tels que les métaux, les plastiques ou les bois vernis. Nous isolons les rayures comme des primitives indépendantes et utilisons leur profil ainsi que le comportement de leur micro-surface pour en simuler numériquement l'apparence. Le résultat de la simulation prend en compte les effets d'ombrage, de masquage mais aussi les inter-réflexions qui se produisent au sein des rayures. Au moment du rendu, nous calculons l'apparence finale en combinant le résultat de ce pré-calcul et les informations de distribution des rayures comprises dans l'empreinte du pixel ou du rayon. Cette méthode nous permet d'obtenir des performances suffisantes pour que l'utilisateur puisse interagir sans impacter la qualité visuelle. Le modèle obtenu reproduit l'apparence d'un matériau compatible avec les différents algorithmes de rendu et d'éclairage classiques.

Chapitre 4 : Édition des reflets anisotropes. L'objectif de ce chapitre est de contrôler la forme des reflets produits par les matériaux anisotropes. Nous proposons une analyse pour mieux comprendre le lien entre la direction de l'anisotropie et la forme de la courbe de reflets anisotropes sur une surface arbitraire. Ces connaissances nous permettent de prédire un champ décrivant les directions de reflets à partir de l'orientation de l'anisotropie du matériau. En prenant inspiration des logiciels de sculpture, nous proposons des outils donnant l'impression à l'utilisateur de manipuler des courbes de reflets tandis qu'il contrôle ce champ d'orientation. Retrouver les orientations d'anisotropies correspondantes conduit à un problème d'optimisation non-linéaire que nous résolvons suffisamment efficacement pour que la manipulation reste interactive. Le champ d'orientation obtenu par notre optimisation produit les reflets désirés et persiste pour de faibles variations de l'éclairage ou du point de vue et des matériaux anisotropes différents.

Chapitre 2

État de l'art

Dans cette thèse, nous cherchons à comprendre les propriétés des matériaux anisotropes présentés dans la section 1.1 afin d'en trouver une représentation ainsi qu'un moyen efficace de contrôler l'apparence résultante. Avant toutes choses, nous définissons les notions communes de synthèse d'images, ainsi que les modèles de représentation et d'évaluation des matériaux dans la section 2.1. Tous les modèles de matériaux essaient de correspondre au maximum à la réalité mais des approximations sont nécessaires pour les rendre utilisables dans les différents contextes du rendu d'images. La section 2.2 compare les modèles sur ces critères de réalisme et d'efficacité. Pour contrôler l'apparence d'une image générée par ordinateur, il est possible de jouer sur de nombreux degrés de libertés comme la forme, l'éclairement, les matériaux mais aussi les chemins lumineux. La section 2.3 est destinée à réaliser l'inventaire et la comparaison de ces méthodes.

2.1 Prérequis

2.1.1 Notations

Tout au long du document, nous travaillons à la surface d'un objet dans un espace tangent défini par un repère orthonormé $[\mathbf{t}, \mathbf{b}, \mathbf{n}]$ où \mathbf{n} correspond à la normale de la surface tandis que \mathbf{t} et \mathbf{b} sont deux vecteurs orthogonaux tangents à la surface. Le domaine dans lequel toute l'évaluation de nos matériaux se fait est l'hémisphère Ω défini autour de \mathbf{n} . Nous considérons dans ce repère les vecteurs unitaires de direction du point de vue ω_{out} et de lumière ω_{in} . La *bissectrice* entre la vue et la lumière \mathbf{h} se calcule de la manière suivante : $\mathbf{h} = \frac{\omega_{out} + \omega_{in}}{\|\omega_{out} + \omega_{in}\|}$. Le vecteur tangent à la surface \mathbf{u} correspond à la direction d'anisotropie et $\mathbf{v} = \mathbf{n} \times \mathbf{u}$ (voir figure 2.1).

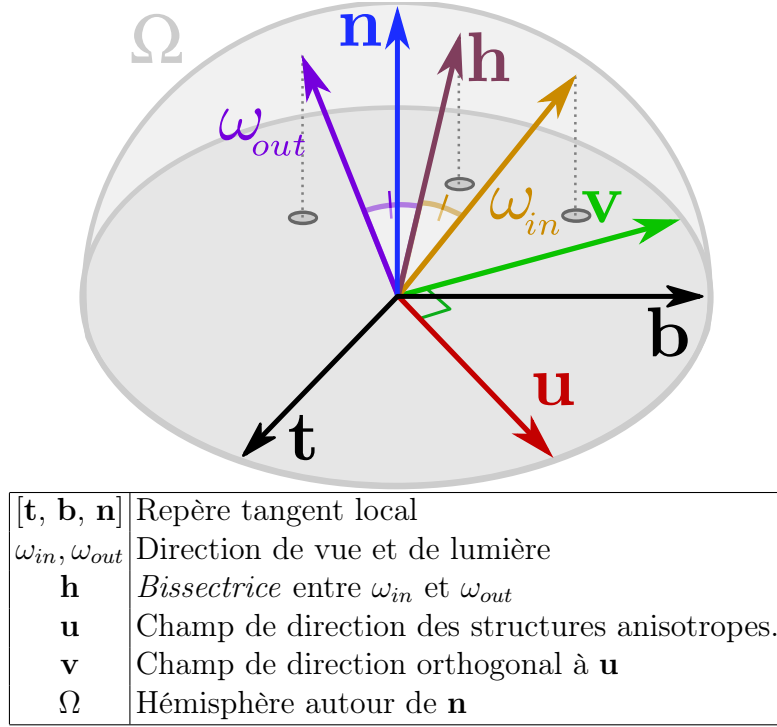


FIGURE 2.1 – Expression du repère tangent et notations.

2.1.2 Équation du rendu

La synthèse d'images réaliste consiste à créer des images correspondant à un point de vue en simulant le transport lumineux dans une scène 3D en supposant un milieu ambiant vide. Les rayons de lumières se propagent en ligne droite dans la scène depuis la caméra jusqu'à ce qu'ils intersectent une surface. La compréhension et la simulation des rebonds lumineux est le coeur des problématiques de la synthèse d'image. L'équation du rendu de Kajiya [Kaj86], brique centrale de la synthèse d'images, correspond à l'expression analytique de ce problème en décrivant la quantité de lumière émise dans la direction ω_{out} au point x :

$$L_{out}(x, \omega_{out}) = L_e(x, \omega_{out}) + \int_{\Omega} \rho_r(x, \omega_{in}, \omega_{out}) L_{in}(x, \omega_{in}) \langle \omega_{in}, \mathbf{n} \rangle d\omega_{in} \quad (2.1)$$

Cette équation d'équilibre exprime $L_{out}(x, \omega_{out})$ la luminance sortante (en $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$), comme la somme de la luminance émise par le point x noté $L_e(x, \omega_{out})$ (en $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$) et de la luminance réfléchie. La luminance réfléchie correspond à l'intégrale des luminances $L_{in}(x, \omega_{in})$ venant de toutes les directions de l'hémisphère Ω défini autour de \mathbf{n} qui sont réfléchies et pondérées par le coefficient de réflectance $\rho_r(x, \omega_{in}, \omega_{out})$ (en sr^{-1}) caractérisant le

matériau et par le terme géométrique $\langle \omega_{in}, \mathbf{n} \rangle$.

Éclairement Le terme $L_{in}(x, \omega_{in})$ correspondant à la luminance provenant de la direction ω_{in} peut être difficile à calculer suivant les cas. Dans le cas d'un éclairage direct, cette quantité correspondra à la luminance directement émise depuis ces directions par des sources de lumières. Évaluer $L_{in}(x, \omega_{in})$ peut alors se faire de deux façons. Soit il existe un nombre fini de directions de lumières, et l'intégrale de l'équation du rendu devient alors une somme sur ce nombre de directions. Soit $L_{in}(x, \omega_{in})$ est défini par des sources de lumière étendues ou une carte d'environnement et l'intégrale devra être approchée numériquement, sauf bien sûr si un autre terme de l'intégrale n'est pas continu. Dans le cas d'un éclairage global, $L_{in}(x, \omega_{in})$ ne correspond plus seulement à la luminance émise par des sources mais aussi à la luminance réfléchie depuis la direction ω_{in} par les autres surfaces de la scène. L'équation du rendu devient alors une intégrale récursive dont l'évaluation précise et efficace est encore une problématique centrale de la synthèse d'image.

2.1.3 BRDF infinitésimale

La BRDF (*Bidirection Reflectance Distribution Function*) est la fonction qui permet de caractériser les propriétés de réflectance du matériau d'un objet opaque [Nic65]. Pour tous les couples $\omega_{in}, \omega_{out} \in \Omega$, la fonction retourne une valeur $\rho_r(\omega_{in}, \omega_{out}) \in \mathbb{R}^+$ correspondant à la proportion d'irradiance venant de la direction ω_{in} qui sera réfléchie dans la direction ω_{out} pour une longueur d'onde donnée. Comme la BRDF est définie pour une aire qui tend vers zéro, nous l'appelons la BRDF infinitésimale en opposition à une BRDF multi-échelles qui prendrait en compte explicitement les variations d'aires.

$$\rho_r(\omega_{in}, \omega_{out}) = \frac{d L_r(\omega_{out})}{L_i(\omega_{in}) \cos \theta_i d \omega_{in}} \quad (2.2)$$

Mathématiquement, cette fonction 4D peut avoir n'importe quelle forme. Physiquement, cette fonction est limitée par les règles fondamentales de l'optique. Elle ne pourra pas être considérée comme *physiquement plausible* si elle ne respecte pas les 3 règles suivantes :

- La règle de positivité $\rho_r(\omega_{in}, \omega_{out}) \geq 0$ signifie qu'il n'y a pas d'énergie négative.
- La conservation d'énergie $\int_{\Omega} \rho_r(\omega_{in}, \omega_{out}) \cos \theta_{in} d \omega_{in} \leq 1$ assure qu'il n'y a pas de création de lumière lors de la réflexion de la lumière sur la surface.
- La réciprocité de Helmholtz $\rho_r(\omega_{in}, \omega_{out}) = \rho_r(\omega_{out}, \omega_{in})$ provient de la symétrie des chemins lumineux en optique.

La BRDF parfaitement miroir $\rho_r(\omega_{in}, \omega_{out}) = \delta(\mathbf{h} - \mathbf{n})$, avec δ la fonction delta de Dirac, correspond à un cas extrême où toute la lumière est renvoyée dans la direction de réflexion. La BRDF lambertienne $\rho_r(\omega_{in}, \omega_{out}) = \frac{1}{\pi}$ correspond à l'autre extrême où la lumière est renvoyée uniformément dans toutes les directions de l'hémisphère.

BRDF anisotrope Comme nous l'avons vu dans l'introduction, il serait possible de diviser les matériaux en deux catégories : les matériaux isotropes et les anisotropes. Mathématiquement, les BRDF isotropes correspondent au cas particulier où la fonction ne varie pas quelle que soit l'orientation du couple $(\omega_{in}, \omega_{out})$ autour de la normale. Autrement dit, le comportement d'une BRDF isotrope ne change pas, peu importe l'orientation du repère tangent dans lequel il est évalué, elle peut donc être représentée avec une fonction 3D. Les BRDF anisotropes quant à elles dépendent de cette orientation autour de la normale, elles nécessitent donc que le repère tangent soit orienté de manière consistante. Les BRDF peuvent être anisotropes à différents degrés. Une légère anisotropie influe seulement sur la nécessité de représenter réellement les quatre dimensions (voir figure 1.3 (b)). Mais lorsque l'anisotropie est très forte, comme c'est le cas pour les rayures par exemple, la BRDF peut alors avoir des lobes très fins nécessitant une représentation capable de gérer les hautes fréquences angulaires (voir figure 1.3 (c)).

2.1.4 Monte-Carlo et échantillonnage préférentiel de la BRDF

Comme nous l'avons précisé dans le paragraphe sur l'éclairage, la luminance réfléchie s'exprime comme une intégrale des luminances sur l'hémisphère autour de \mathbf{n} pondérée par la BRDF et le terme géométrique. Dans le cadre de l'éclairage direct, il est possible de réduire cette intégrale à une somme lorsque le nombre de sources lumineuses est fini. De la même manière, si le matériau est parfaitement miroir par exemple, il suffit d'évaluer la valeur de luminance dans la direction de réflexion car toutes les autres directions n'auront pas d'impact. Lorsque l'intégrale doit vraiment être évaluée, l'approche de Monte-Carlo consiste à échantillonner le domaine. La somme pondérée des échantillons est alors une approximation de l'intégrale qui tendra vers le résultat exact lorsque le nombre d'échantillons tend vers l'infini :

$$\int_a^b g(x) dx = \mathbb{E}(g(X_i)) = \sum_{i=1}^{\infty} g(X_i)p(X_i) \quad (2.3)$$

avec $g(x)$ la fonction à intégrer, $X \in [a, b]$ une valeur aléatoire de probabilité p avec $\sum_{i=1}^{\infty} p(X_i) = 1$.

Pour estimer la luminance réfléchie, l'échantillonnage se fait alors sur Ω , le domaine de l'hémisphère. Pour diminuer le temps de calcul, l'objectif est donc d'utiliser le moins d'échantillons possible tout en gardant la meilleure approximation possible. Une approche naïve consiste à échantillonner uniformément cet hémisphère. Néanmoins, sauf dans le cas d'un matériau très mat et d'un éclairage très uniformément réparti, beaucoup d'échantillons calculés contribueront très peu au résultat. À l'inverse, l'échantillonnage uniforme nécessitera beaucoup d'échantillons pour espérer tomber sur les pics spéculaires du matériau où sur les zones très lumineuses de l'hémisphère.

La solution est donc d'envoyer des échantillons dans des directions ω_{in} où $\rho_r(x, \omega_{in}, \omega_{out})$ et $L_{in}(x, \omega_{in})$ ont des valeurs élevées ; c'est l'échantillonnage préférentiel.

Si seul l'éclairage direct est considéré, il est possible de connaître à l'avance le contenu de l'environnement lumineux. Cette connaissance est alors nécessaire pour un échantillonnage préférentiel. Lorsque l'éclairage est global, les a-priori sont alors faussés par d'importantes sources lumineuses qui peuvent provenir de reflets sur d'autres surfaces. Une autre approche est de choisir les échantillons en fonction de la BRDF qui est forcément connue préalablement et qui ne dépend pas du reste de la scène.

À partir d'une BRDF et du terme géométrique, une *fonction d'échantillonnage* peut donc être dérivée en fonction de la réflectance du matériau. Pour fonctionner, la méthode de Monte-Carlo a plus précisément besoin de la fonction de densité de probabilité (PDF) qui approche au plus près le comportement de $\rho_r(\omega_{in}, \omega_{out}) < \omega_{in}, \mathbf{n} >$. La fonction de répartition (ou CDF : *Cumulative Distribution Function* en anglais) de la PDF est alors calculé puis inversé pour donner la CDF inverse, ou *fonction d'échantillonnage*. Pour être utilisés efficacement dans les algorithmes de rendu actuels, les modèles de BRDF doivent donc fournir les 3 fonctions essentielles suivantes :

- Une fonction d'évaluation $\rho_r(\omega_{in}, \omega_{out})$.
- La CDF inverse, une fonction d'échantillonnage préférentiel qui à partir de la direction de vue ω_{out} et de variables aléatoires retourne une direction ω_{in} .
- La fonction de densité de probabilité (PDF) correspondant à la CDF.

2.2 Modèles de matériaux

Dans cette section nous nous intéressons aux différents modèles de matériaux qui ont été explorés dans la littérature. Nous proposons dans un premier temps un état de l'art des modèles de BRDF infinitésimale. Nous introduisons ensuite les différents modèles de pré-filtrage des informations géométriques. La

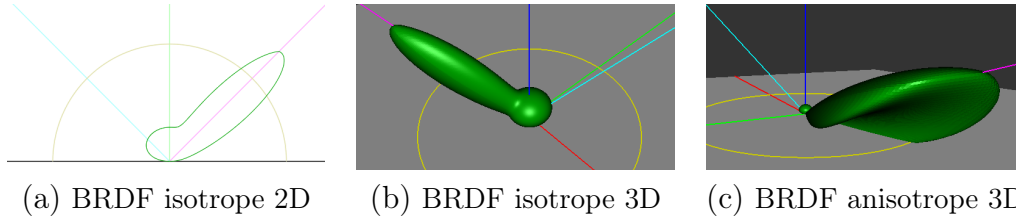


FIGURE 2.2 – (a,b) Une BRDF isotrope peut être vue comme la combinaison d’une composante diffuse avec un lobe spéculaire. (c) Les BRDF anisotropes ont un comportement complexe qui varie lorsque \mathbf{h} tourne autour de la normale.

dernière partie de cette section est une rétrospective des modèles de matériaux multi-échelles.

2.2.1 Matériaux homogènes

La théorie des micro-facettes [TS67] est un modèle permettant de faciliter la compréhension du lien entre la micro-surface à une échelle fixée et l’apparence des matériaux. Elle est aujourd’hui l’approche standard en informatique graphique. Dans cette théorie, la surface est supposée constituée d’une collection de micro-facettes caractérisées par leurs orientations définies par leurs normales. Le modèle de micro-facettes représente alors statistiquement les propriétés de réflectance de cette micro-surface. La forme de la BRDF est principalement déterminée par le terme de distribution des normales des micro-facettes $D : S^2 \rightarrow \mathbb{R}$. Le terme géométrique $G : S^2 \times S^2 \rightarrow \mathbb{R}$ permet de prendre en compte statistiquement les positions relatives entre les facettes pour représenter les effets d’ombrage et de masquage. Le terme de Fresnel $F : S^2 \times S^2 \rightarrow \mathbb{R}$ sépare la proportion d’énergie transmise de celle qui est réfléchi. La position des micro-facettes est secondaire dans cette représentation et les inter-réflexions sont généralement ignorées. Bien que les micro-facettes puissent posséder n’importe quelle BRDF, des cas très simples sont considérés pour générer les modèles de BRDF présentés dans la section suivante. Le modèle de BRDF d’Oren-Nayar [ON94] se base sur des micro-facettes diffuses, mais dans les autres cas, la micro-facette est considérée comme un miroir parfait ou un réflecteur de Fresnel où le rayon est soit réfracté, soit réfléchi dans la direction miroir, soit absorbé [WMLT07]. Dans le cas de micro-facettes parfaitement spéculaires, la BRDF est exprimée de la manière suivante :

$$\rho_{microfacet}(\omega_{in}, \omega_{out}) = \frac{D(\mathbf{h})G(\omega_{in}, \omega_{out})F(\omega_{in}, \mathbf{h})}{4|\mathbf{n} \cdot \omega_{in}||\mathbf{n} \cdot \omega_{out}|} \quad (2.4)$$

Modèles empiriques Avant l’utilisation de la théorie des micro-facettes, les modèles de Phong [Pho75] et de Blinn-Phong [Bli77] constituaient les deux

principales fonctions analytiques permettant de représenter la réflectance. Ils sont tous les deux issus de l'observation selon laquelle beaucoup de matériaux peuvent être séparés en deux composantes. La composante diffuse correspond à la réflexion uniforme d'un rayon incident dans toutes les directions, elle ne dépend pas de la direction de vue. La composante spéculaire correspond aux reflets d'un matériau, une grande partie de la lumière incidente étant réfléchie vers la direction miroir. Cette composante spéculaire se caractérise par l'apparition notable d'un *lobe* spéculaire dans la direction miroir (voir figure 2.2). Pour les matériaux plutôt mats, la composante diffuse sera plus forte tandis que le lobe spéculaire sera faible et étendu alors que pour des matériaux brillants, la composante diffuse sera faible et le lobe spéculaire sera intense et concentré. Heidrich et Seidel [HS98] proposent un terme de distribution basé sur le modèle de Phong pour évaluer en temps réel un matériau anisotrope. Le modèle de Lafortune [LFTG97] étend l'approche en utilisant plusieurs lobes pour mieux représenter le matériau mais les paramètres peuvent générer des BRDF qui ne sont pas physiquement plausibles.

Termes de distribution mono-lobes Le modèle de Cook-Torrance [CT81] correspond à la première apparition du modèle de micro-facettes en informatique graphique. La distribution des normales y est approchée par un terme de distribution statistique simple qui représente l'apparition du lobe spéculaire de manière plus précise. Dans cette première approche, seules les distributions isotropes Gaussienne et de Beckman sont proposées. La BRDF de Ward [War92] contient un nouveau terme de distribution Gaussien. Ce terme de distribution est cette fois-ci anisotrope, il permet alors une meilleure représentation mais surtout donne accès à une plus grande gamme de matériaux, dont ceux qui nous intéressent.

Terme géométrique Bien que le terme de distribution influe majoritairement sur la représentativité de la BRDF, c'est le terme géométrique $G(\omega_{in}, \omega_{out})$ qui représente les effets d'ombrage et de masquage produits par la position des facettes les unes par rapport aux autres. Le générateur de modèle de micro-facettes d'Ashikhmin et al. [APS00] propose un terme géométrique plus générique. Dans ce modèle, il ne reste alors plus qu'à introduire un terme de distribution approchant au mieux les statistiques de la micro-surface pour obtenir une BRDF physiquement plausible. Le modèle de BRDF d'Ashikhmin-Shirley [AS00] basé sur ce générateur, propose un terme de distribution anisotrope fondé sur Blinn-Phong [Bli77] pour créer un modèle de BRDF anisotrope physiquement plausible.

Acquisition et comparaisons Dans le but de créer des BRDF générées par interpolation de BRDF mesurées, la méthode de Matusik [MPBM03] a permis la création de la base de données de MERL regroupant de nombreuses mesures

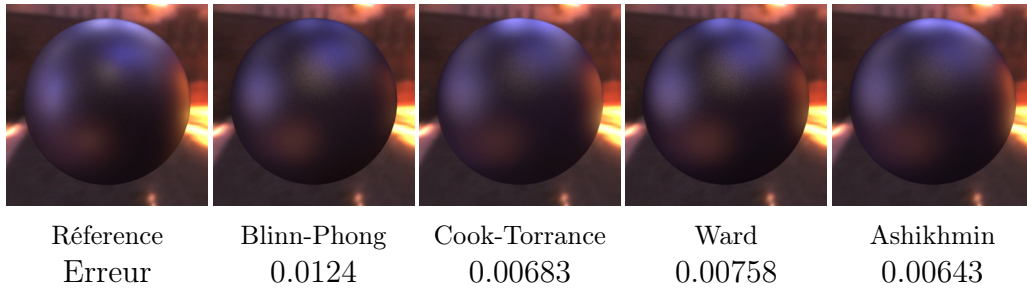


FIGURE 2.3 – L’étude de [NDM05] a permis de comparer différents modèles de BRDF sur une importante base de données de matériaux mesurés majoritairement isotropes. Les valeurs correspondent à l’erreur liée à la régression des données vers le modèle.

de BRDF sur de nombreux matériaux, tous isotropes. La comparaison de Ngan et al. [NDM05] consiste à réutiliser cette base de données, d’y ajouter des mesures de BRDF anisotropes et de comparer les modèles de BRDF face à ces données. Chacun des modèles est alors paramétré à l’aide d’une minimisation numérique pour se rapprocher au plus près des données mesurées. En plus de la mesure d’erreur faite par la régression linéaire pour le modèle de BRDF, il est également possible de comparer qualitativement chacun des modèles à l’aide d’un rendu effectué pour chaque couple matériau-modèle de la base de données finale (voir figure 2.3). En pratique, le travail de Ngan et al. a permis l’ajout de seulement quatre BRDF anisotropes à la base de données de Matusik et les mesures ne sont pas suffisamment denses pour capturer précisément les hautes fréquences angulaires. La méthode d’acquisition de Filip et al. [FVH⁺13] est spécialement conçue pour les matériaux anisotropes et permet d’obtenir des données mesurées plus denses. La base de données de l’UTIA utilise cette méthode et propose quelques BRDF anisotropes mesurées plus précises que celles de la base de données de MERL. Les mesures restent néanmoins insuffisantes pour représenter efficacement les matériaux très haute fréquence.

Modèles basés sur les primitives

Un terme géométrique générique comme celui d’Ashikhmin [APS00] ou de Smith [Smi67] est utile lorsque les connaissances de la micro-surface sont faibles ou faciles à représenter statistiquement. Dans le cas plus spécifique où un motif se répète à la surface de l’objet, il devient alors possible d’exploiter cette connaissance et de trouver un meilleur terme géométrique. Le modèle de BRDF de Poulin [PF90] est un modèle basé sur une primitive. La micro-surface est composée de cylindres parallèles, la hauteur et l’espacement des cylindres influant sur l’apparence finale. Grâce à cette représentation géométrique, $G(\omega_{in}, \omega_{out})$ peut alors être calculé plus fidèlement pour mieux représenter les matériaux anisotropes dont la micro-surface s’approche des hypothèses

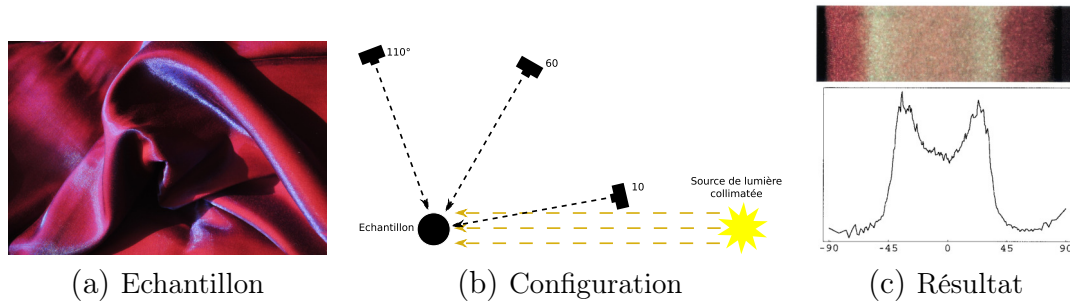


FIGURE 2.4 – (a) La réflectance d'un échantillon de matériau anisotrope est (b) mesurée selon plusieurs points de vue. (c) Dans certains cas, il peut y avoir plusieurs lobes spéculaires.

de micro-géométrie.

L'étude de Pont et Koenderink [PK03] porte sur la réflectance des matériaux anisotropes possédant une géométrie très régulière. Un objet dont la surface est régulière comme un tissu (voir figure 2.4 (a)) est placé sur un cylindre. La réflectance est mesurée pour différentes positions de lumière et de caméra dans le plan de coupe du cylindre (voir figure 2.4 (b)). A partir de ces quelques mesures de la BRDF, l'approche permet de lier la présence de plusieurs lobes spéculaires avec l'apparence particulière du matériau mesuré (voir figure 2.4 (c)). Le résultat de cette expérience montre que certains matériaux anisotropes comme le tissu produisent une séparation du lobe spéculaire qui ne peut pas être correctement représentée par des modèles d'apparence mono-lobe comme ceux que nous avons vus précédemment. Sadeghi et al. [SBdDJ13] propose un modèle de BRDF empirique basé sur une analyse poussée des primitives qui constituent le tissu. Ce modèle permet de recréer l'apparence des multiples lobes de tissu mesurés par Pont et Koenderink [PK03].

L'étude de Merillou et al. [MDG01] est consacrée à l'analyse du lien entre la géométrie et l'apparence de rayures isolées. Elle part de la géométrie d'une rayure mesurée avec un profilomètre (voir figure 2.5 (a)) et propose un modèle spécifique de BRDF. Le modèle de Bosch [BPMG04] propose également un modèle de BRDF cette fois-ci physiquement réaliste de rayures isolées. La méthode se base sur l'hypothèse que la rayure est localement droite pour permettre de réduire la géométrie d'une dimension. Le terme de distribution est calculé à partir des principes de la théorie des micro-facettes appliqués aux différents segments du profil dont la micro-BRDF peut-être contrôlée. Comme l'approche s'inspire des micro-facettes, elle ne permet pas de gérer les inter-réflexions à l'intérieur de la rayure. Le terme géométrique est calculé numériquement à partir de la géométrie explicite de la rayure. La fonction d'évaluation proposée ne permet pas de prétendre à des performances temps réel et l'absence de fonction

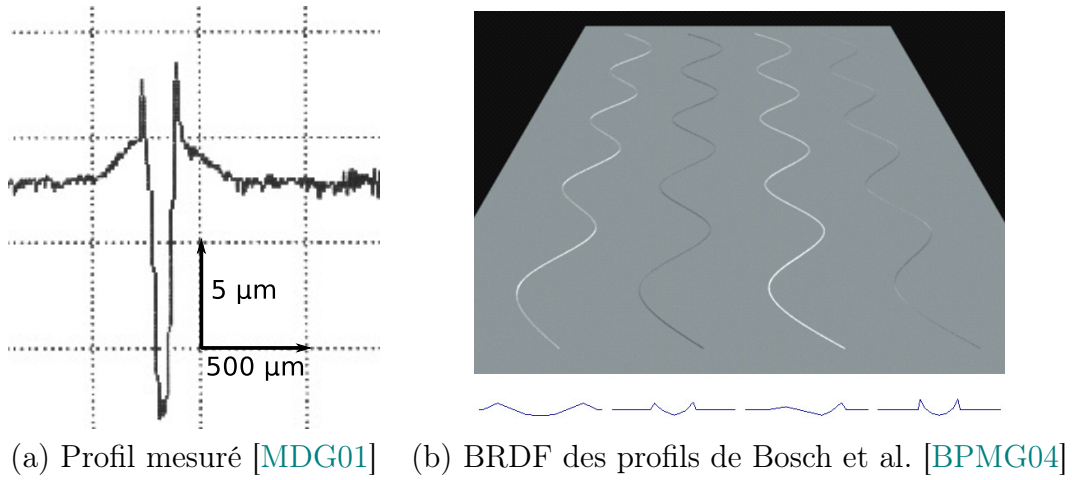


FIGURE 2.5 – (a) Afin de mieux en représenter l'apparence, Merillou et al. [MDG01] mesure des profils de coupes de rayure. (b) A partir de profils générés, Bosch et al. [BPMG04] permet de créer une BRDF de rayure physiquement plausible pour la synthèse d'image.

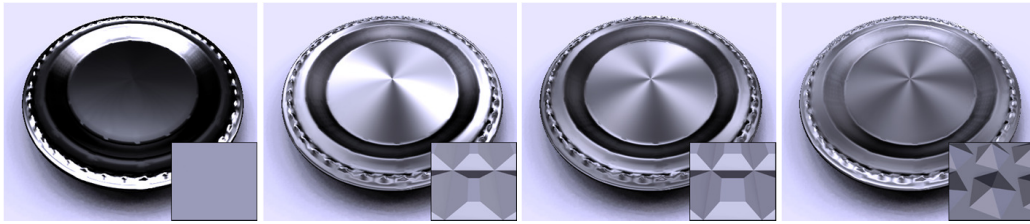


FIGURE 2.6 – Dans la méthode de Wu et al. [WDR11], la micro-géométrie est explicitement donnée afin de produire la BRDF infinitésimale correspondante. Les bons choix de structures permettent d'obtenir des BRDF anisotropes.

d'échantillonnage empêche d'utiliser efficacement des cartes d'environnement (voir figure 2.5 (b)). De plus, bien que le modèle aboutisse à un comportement anisotrope, il ne permet pas d'être utilisé dans un cas plus général que celui des rayures isolées.

Les méthodes précédentes permettent d'obtenir des modèles de BRDF des matériaux composés de primitives bien particulières. Différentes méthodes basées sur une apparence à deux échelles distinctes généralisent l'approche en offrant la possibilité de paramétrer la primitive qui compose la micro-géométrie [WAT92, HDKS00, WDR11]. A partir de la micro-géométrie définie par l'utilisateur à l'échelle microscopique, la méthode permet d'obtenir une BRDF correspondant à l'apparence à une échelle suffisamment éloignée pour que le matériau soit homogène. L'utilisateur peut définir la micro-géométrie mais aussi caractériser localement les propriétés de réflectance (voir figure 2.6).

Alternativement, cette méthode pourrait être utilisée comme un outil de pré-calcul d'une géométrie vue de très loin.

L'article d'Ashikhmin [APS00] propose également un modèle de BRDF du velours. La représentation du velours est un cas limite d'homogénéité. Comme tous les matériaux, il est possible de le représenter avec une BRDF infinitésimale si le point de vue est suffisamment éloigné. Cependant, à l'échelle humaine, les variations spatiales produites par les mailles commencent à apparaître et doivent être prises en compte pour obtenir une apparence réaliste. Le modèle d'apparence de tissus d'Irawan et Marschner [IM12] sépare les différentes échelles et propose des solutions pour chacune d'elles. Lorsque le point de vue s'approche suffisamment de la surface, le modèle de BRDF est remplacé par un autre modèle plus coûteux prenant en compte les variations spatiales pour une apparence plus réaliste. Le traitement des variations spatiales ou des matériaux multi-échelles dans un cadre plus général que les tissus pose aujourd'hui l'un des défis majeurs dans le domaine de la recherche en synthèse d'image et plus particulièrement en rendu de matériaux réalistes.

2.2.2 Apparence multi-échelles

Dans la section précédente, nous avons considéré les BRDF infinitésimales telles que nous les avons définies dans la section 2.1. Dans cette section, nous abordons des méthodes permettant de représenter l'apparence multi-échelles des matériaux. La différence principale est donc de ne plus considérer que l'*aire* tend vers zéro mais au contraire la prendre en compte comme un paramètre supplémentaire.

Pré-filtrage multi-échelles

Pour un point de vue distant, plusieurs triangles d'un maillage peuvent se trouver dans un même pixel. Pour trouver la couleur juste du pixel il faut alors être capable de calculer l'intégrale de l'apparence des différents points présents dans son "empreinte". Une approche consiste à échantillonner des sous-parties du pixel et évaluer la couleur moyenne. Cette approche est générale, robuste et converge vers le résultat exact. Son principal inconvénient, comme toutes les méthodes d'échantillonnage, est que la qualité de l'approximation dépend du nombre d'échantillons utilisés et devient donc très vite coûteuse notamment lorsque le signal contient des hautes fréquences. Une première étape d'accélération consiste à remplacer les lourdes informations géométriques par une géométrie simple et à capturer les détails à la surface dans des cartes de paramètres, le plus souvent des textures. L'intérêt de ces cartes de paramètres est qu'elles permettent, lorsque cela est possible, de découpler certains éléments de

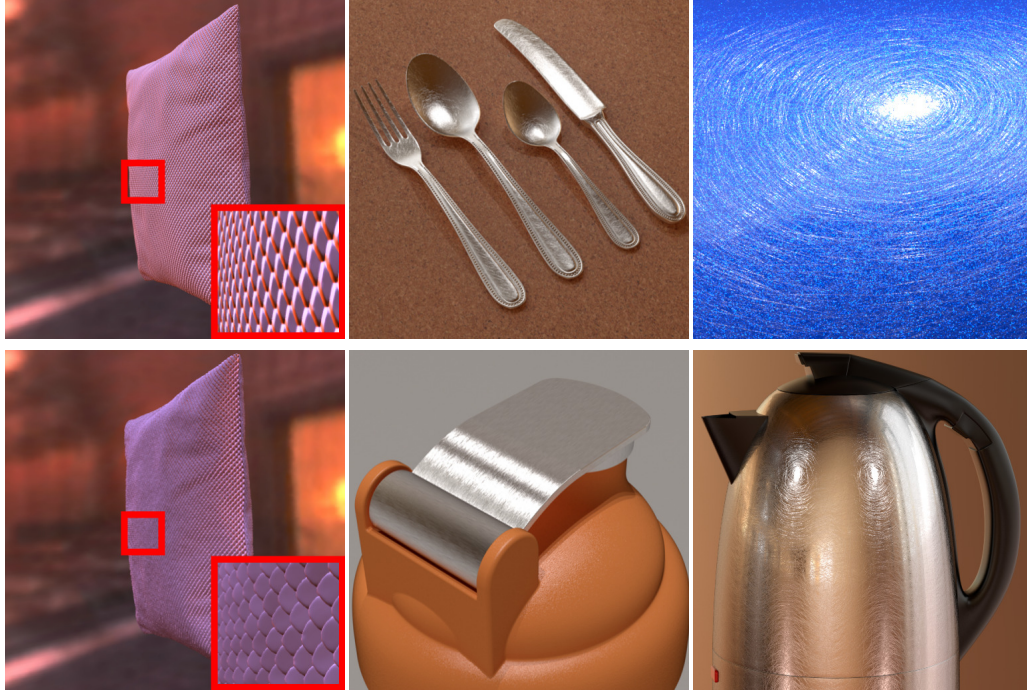
la géométrie. Une fois découplé, l'avantage supplémentaire réside dans la possibilité de pré-filtrer ces cartes pour anticiper leurs comportements à différentes échelles sans avoir à faire du sur-échantillonnage au moment de l'évaluation.

L'objectif est alors de trouver les paramètres qui peuvent être facilement pré-filtrés. Autrement dit, étant donnée une texture de haute-résolution dont plusieurs texels apparaissent au sein d'un même pixel, est-il possible de trouver la texture de plus faible résolution qui peut représenter les comportements qu'auraient eus ses sous-texels. Pour une texture représentant simplement des couleurs, il est simple d'imaginer que la couleur d'un texel d'une texture de basse résolution sera la moyenne de la couleur des sous-texels de la texture de résolution supérieure.

Mais ce pré-filtrage linéaire n'est pas toujours possible. Dans leur étude Bruneton et Neyret [BN11] fournissent un état de l'art sur les représentations efficaces pouvant être pré-filtrées. Le pré-filtrage non linéaire des cartes de normales et de déplacement est une problématique dont les principales avancées sont présentées dans la suite de cette section.

Bruneton [BNH10] utilise le cas particulier de l'océan pour proposer un modèle d'apparence multi-échelles. A partir d'un point de vue proche où la géométrie y est explicitement modélisée, elle est filtrée jusqu'à devenir une carte de normales pour des points de vue plus distants. Ensuite lorsque le point de vue s'éloigne encore, la BRDF de Ross [RDP05] spécifique à l'apparence des océans permet de conserver des performances temps réel en évitant le crénelage causé par une carte de normales trop fine.

Comme une carte de normales ne peut pas être pré-filtrée en faisant une simple moyenne, il faut trouver une représentation alternative qui puisse l'être. Les modèles de Tan [TLQ⁺05, TLQ⁺08] et de Han [HSRG07] proposent de pré-filtrer la carte des normales en utilisant des fonctions de distribution des normales (NDF). Le modèle de Tan approxime statistiquement l'ensemble des normales à pré-filtrer avec un mélange de Gaussienne. Dans la méthode de Han, le comportement des normales est divisé en deux composantes. Le comportement basse fréquence des normales est représenté par des fonctions en harmoniques sphériques qui nécessitent peu de coefficients pour l'approcher efficacement. Un mélange de distributions de von Mises-Fisher est utilisé pour le comportement haute fréquence. Dans la méthode LEAN [OB10], une BRDF est employée afin de filtrer le comportement des normales. Le terme de distribution de cette BRDF basée sur la théorie des micro-facettes est caractérisé par les différents moments statistiques des normales pour mieux les approcher. L'idée principale est d'utiliser une distribution mono-lobes complexe qui est plus facile à filtrer que les multiples lobes causés par les normales et qu'il faut



(a) Filtrage de [DHI⁺13] (b) Filtrage de [YHJ⁺14] (c) Filtrage de [YHR16]

FIGURE 2.7 – (a) La différence entre une carte de normale en haut et une carte de déplacement en bas montre l'importance de l'information géométrique sur l'apparence. La méthode de filtrage de cartes de déplacement de LEADR [DHI⁺13] permet d'avoir une représentation multi-échelle et efficace de la géométrie. (b) La méthode de [YHJ⁺14] permet de filtrer les cartes de normales en conservant les détails des rayures (en haut) et du métal brossé (en bas). (c) L'article [YHR16], dans la continuité de son prédécesseur permet d'améliorer les performances et de gérer les cartes d'environnements.

réussir à réunir lors du filtrage. Grâce à l'utilisation du modèle de NDF, il devient possible de pré-filtrer les cartes de normales pour pouvoir les utiliser dans le cadre du rendu temps réel. Comme les distributions des pentes peuvent être interpolées, il est possible de passer de manière continue d'une échelle à une autre sans changement soudain de l'apparence. Ces modèles permettent donc une apparence multi-échelles. Néanmoins, basés seulement sur les normales, ils ne prennent pas en compte les effets d'ombrage ni de masquage pourtant importants pour le réalisme de l'apparence.

La méthode de LEADR [DHI⁺13] est une extension de la méthode de LEAN qui permet d'effectuer le pré-filtrage des cartes de déplacement qui ont l'avantage de conserver les événements liés à la visibilité (voir figure 2.7 (a)). La méthode s'appuie sur une représentation des pentes par des moments statistiques à la manière de LEAN. Grâce aux informations de la carte de déplacement, le pré-filtrage permet aussi de paramétrer précisément le terme de visibilité de Smith [Smi67] pour augmenter le réalisme du résultat et rester plus précis aux angles rasants.

L'inconvénient principal de ces approches est qu'elles reposent sur l'idée que la distribution de la géométrie est relativement basse fréquence. Lorsque ce n'est pas le cas, ces approches ont tendance à lisser excessivement l'apparence et provoquer une perte des détails lors de certaines transitions.

Lorsqu'une carte de normales n'est pas filtrée, le comportement d'un pixel à l'autre varie fortement et des problèmes de crénelage apparaissent. C'est pour réduire ce problème que les précédents modèles de pré-filtrage tels que LEAN [OB10] sont apparus. Néanmoins, parfois le bruit apparent à la surface de l'objet n'est pas dû à un problème de crénelage mais fait effectivement partie intégrante des détails de l'apparence. Ces cas correspondent à la présence de hautes fréquences dans la géométrie initiale qui, lorsqu'elle est structurée, peut rendre les méthodes précédentes inefficaces à cause de leur approche statistique qui gomme ces détails. Bien qu'elle permette de filtrer toutes les cartes de normales haute résolution, la technique de Yan et al. [YHJ⁺14, YHR16] est plus utile que les approches précédentes dans les cas où la carte de normales représente un matériau structuré haute fréquence comme les métaux brossés, rayés, les peintures métallisées mais aussi la surface d'un océan (voir figure 2.7 (b)). Pour chaque pixel, la NDF est calculée comme une distribution de probabilité des normales projetées sur le disque unitaire à partir de la carte de normales. L'avantage de cette approche est qu'elle permet de faire la différence entre le crénelage et les détails d'apparences liés aux hautes fréquences du matériau. Le filtrage permet alors de conserver tous les détails de l'apparence sans que le temps de calcul ne devienne trop important. Un inconvénient de

l'approche est qu'elle n'offre une solution que pour le cas des lumières ponctuelles ou directionnelles et que l'évaluation n'est pas accélérée pour les cartes d'environnements.

La seconde itération de l'approche de Yan [YHR16] permet de réduire encore le temps de rendu et surtout offre une solution efficace pour l'échantillonnage préférentiel. La NDF est approchée à l'aide de nombreuses Gaussiennes permettant de conserver les détails de l'apparence. Ces Gaussiennes sont néanmoins évaluées efficacement à l'aide d'une structure de données adaptée. Comme la méthode précédente, ce pré-filtrage de normales nécessite une carte de normales de très haute résolution et un lourd pré-calcul. Comme elle est basée sur les cartes de normales, cette approche ne prend pas en compte les inter-réflexions, les effets d'ombrage ni de masquage.

Solutions basées sur les BTF

L'utilisation d'une carte de normales ou d'une carte de déplacement implique de faire l'hypothèse que les variations angulaires et les variations spatiales sont indépendantes. Dans le cas des matériaux structurés tels que les tissus ou les métaux brossés, cette hypothèse n'est pas toujours vraie. La *Bidirectional Texture Function* (BTF) est une fonction tabulée à six dimensions qui permet potentiellement de représenter tous les effets de l'apparence sur une surface. De la même manière qu'une BRDF peut être mesurée, la BTF correspond au résultat de la capture de l'apparence d'un matériau sur un échantillon. En pratique, elle est créée à partir d'un grand nombre de prises de vue de l'échantillon avec différents points de vue et directions de lumière. La capture est donc longue et la BTF 6D obtenue nécessite beaucoup de mémoire, souvent de l'ordre du Giga-octet. Néanmoins, comme elle est issue de données mesurées, tous les effets complexes tels que l'auto-ombrage et les inter-réflexions y sont implicitement représentés. Les approches de Muller et al. [MMS⁺05] et de Baril et al. [BBGS08] utilisent des méthodes de compression afin de gérer la lourdeur intrinsèque de la texture pour pouvoir l'utiliser dans le cadre du rendu en temps réel. L'article de Ma et al. [MCT⁺05] va plus loin et permet de trouver une méthode de pré-filtrage de la BTF pour pouvoir la rendre multi-échelles et utilisable en temps-réel. Comme les BRDF mesurées, les BTF s'appuient sur des données. La résolution des données va alors avoir un impact sur la représentativité de la BTF. Lorsque le matériau capturé est anisotrope, il devient alors nécessaire d'avoir une importante résolution spatiale et angulaire pour le reproduire. Comme 6 dimensions sont représentées, l'augmentation de la résolution a un impact très important sur la quantité de mémoire nécessaire, qui est déjà problématique. Cela rend son utilisation difficile voire impossible pour des matériaux hautes fréquences tels que les matériaux anisotropes.

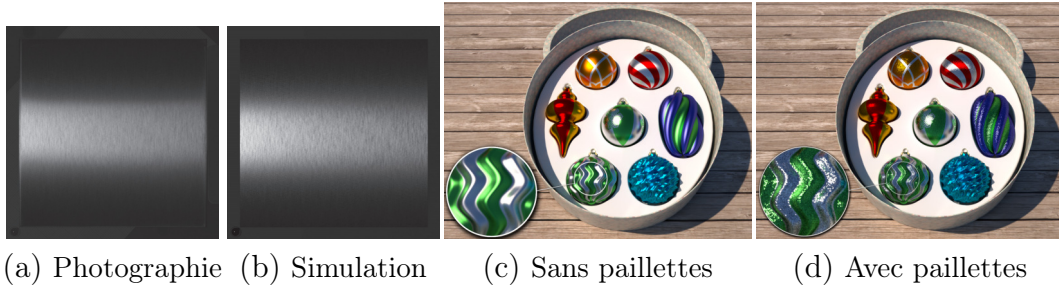


FIGURE 2.8 – (a) Grâce à un modèle de BRDF spécifique et un modèle de variation spatiale cohérent, le modèle de Dong [DWMG15] s’approche de l’apparence d’un métal brossé. (b) Le modèle de BRDF de Jakob [JHY⁺14] spécifique aux matériaux scintillants permet de les simuler à de multiples échelles.

Variations des paramètres de la BRDF

Le modèle de BRDF de Dong et al. [DWMG15] est le premier modèle d’apparence spécifique pour des métaux brossés. Comme elle est majoritairement composée de rayures, la géométrie de ces matériaux est hautement anisotrope puisque les normales varient peu dans la direction des rayures tandis qu’elles varient fortement dans la direction orthogonale. La BRDF résultante est donc anisotrope et possède de hautes fréquences angulaires. De la même manière que pour toutes les mesures basées sur un matériau anisotrope, la capture de la BRDF anisotrope avec un gonio-réfectomètre est fastidieuse. L’approche de la méthode de Dong et al. est donc de mesurer la géométrie plutôt que la réponse lumineuse pour gagner du temps à la capture des matériaux. Pour cela, un profilomètre est utilisé pour mesurer le champ de hauteur d’une petite parcelle de la surface. À partir de cette géométrie, la distribution des normales est calculée et peut ainsi être intégrée au modèle de BRDF de micro-facettes. Un terme d’ombrage spécifique pour les matériaux brossés est utilisé mais sa validité n’est pas démontrée. La distribution des normales est approximée par une distribution GGX anisotrope [Bur12] à laquelle ont été ajoutés des coefficients de décalage sur les 3 axes du repère. Le décalage permet de caractériser la différence entre la moyenne des normales des micro-facettes et la normale de la surface. Lorsque l’aire de la surface de mesure augmente, les paramètres de la distribution évoluent. Pour une surface assez grande, le modèle de BRDF de Dong converge vers une représentation proche des BRDF plus classiques. Le calcul de BRDF dépend de la surface mesurée et donc de l’échelle d’évaluation. La BRDF de Dong est complétée par un modèle de variations spatiales. À partir des données, des statistiques de variation des paramètres sont extraites puis réutilisées afin de créer une carte de paramètres permettant de simuler les hautes fréquences de variations spatiales essentielles au réalisme de l’apparence (voir figure 2.8 (a,b)). Si le modèle fournissait un moyen d’interpoler la BRDF entre deux échelles, il pourrait être multi-échelles.

Le modèle de BRDF de Jakob et al. [JHY⁺14] utilise les propriétés spécifiques des matériaux scintillants pour créer un modèle d'apparence multi-échelles (voir figure 2.8 (c,d)). Les matériaux scintillants sont composés de deux parties distinctes, la base choisie arbitrairement qui est le plus souvent homogène et une couche de paillettes disposées et orientées aléatoirement. Lorsque la vue est distante, une approche statistique suffit à rendre précisément l'apparence homogène du matériau. Mais lorsque la vue est proche, le comportement des paillettes se différencie d'un pixel à l'autre et un modèle de BRDF infinitésimales est insuffisant pour le représenter. La BRDF multi-échelles correspond à l'intégrale des BRDF des paillettes qui se trouvent sous le pixel à évaluer $\rho(S, \omega_{out}, \omega_{in}) \propto \int_S \rho_{paillette}(\omega_{out}, \omega_{in})$. Techniquement, le modèle s'appuie sur le modèle de micro-facettes avec un terme de distribution discrétisé qui est évalué pour chaque pixel en fonction de l'échelle. Cette approche permet d'éviter les flous produits par les NDF habituellement utilisées dans les modèles de micro-facettes standards. Bien que ce modèle basé sur une moyenne de BRDF permette d'obtenir une apparence photo-réaliste de matériaux scintillants, il n'est pas suffisamment performant pour être utilisé en rendu temps réel.

Résumé Nous avons vu dans cette section que la recherche a produit de nombreux modèles d'apparence de matériaux qui recouvrent une grande partie des matériaux existants mais pas de tous ni à toutes les échelles. Les modèles de BRDF infinitésimales permettent de représenter les matériaux homogènes. Le filtrage des variations spatiales de la géométrie a conduit à l'utilisation de carte de normales et de carte de déplacement qui peuvent être pré-filtrées pour conserver des temps de rendu suffisamment bas et permettre d'atteindre des performances temps réel. Les cartes de déplacement permettent de conserver les informations géométriques et donc de garantir un meilleur filtrage de l'apparence initiale. Cependant, la plupart des méthodes génériques se basent sur le comportement statistique de la surface, ce qui entraîne un lissage excessif et une perte de détail de l'apparence de certains matériaux structurés. Certains modèles de matériaux très spécifiques ont émergé pour représenter efficacement ces matériaux trop complexes afin de mieux restituer leurs particularités. Le modèle de Dong et al. [DWMG15] a également montré l'importance de la représentation des variations spatiales pour ces matériaux. Récemment, plusieurs modèles spécifiques aux rayures, aux matériaux brossés et aux matériaux hautes fréquences sont apparus montrant à la fois que ces matériaux sont difficiles à représenter mais également que les détails qu'ils apportent sont très importants pour les identifier. La motivation de la contribution que nous présentons dans le chapitre 3 repose sur la volonté de créer un modèle spécifique d'apparence qui utilise les propriétés des matériaux brossés et rayés pour avoir des performances temps réel, sans sacrifier la qualité du rendu et la richesse de l'apparence.

2.3 Contrôle de l'apparence

Les artistes n'ont pas attendu d'avoir des outils de haut niveau pour éditer l'apparence d'une scène. La méthode d'édition la plus couramment utilisée est l'approche de l'essai-erreur. Elle consiste à converger vers l'apparence voulue en changeant les paramètres de la scène et en regardant l'impact du changement sur l'apparence recalculée. Pour que cette approche fonctionne, il faut que le retour visuel soit immédiat ou au moins interactif. Dans le cas où la scène ne permet pas un retour visuel immédiat, l'artiste pourra la simplifier, mais il court le risque que ses modifications ne donnent plus le résultat désiré au cours de leur utilisation dans la scène finale. De plus, le comportement de certains paramètres peut être difficile à prévoir et compliquer la convergence vers l'apparence voulue. L'amélioration du temps de rendu et les paramétrisations propices à l'édition sont décrites dans la section 2.3.1. Lorsque beaucoup de degrés de liberté sont mis en jeu, les paramètres de la scène ne peuvent pas être traités de cette façon et nécessitent un contrôle à plus haut niveau. La meilleure approche dans ce cas est de partir de la caractérisation du résultat voulu par l'artiste. Les méthodes proposées dans la section 2.3.2 opèrent alors une optimisation inverse où l'objectif est de trouver les paramètres de la scène qui permettent d'obtenir le résultat désiré.

2.3.1 Approche directe

Cette section décrit les outils de contrôle utilisés pour éditer directement la scène. Bien qu'elle soit la plus simple, cette approche possède deux défauts inhérents. D'abord elle nécessite un retour visuel rapide pour que l'artiste puisse vite converger vers le résultat attendu. Cette convergence devient aussi difficile si trop de paramètres, ou de manière plus générale trop de degrés de liberté, sont mis en jeu.

Les deux articles de Ben-Artzi et al. [BAOR06, BAEDR08] s'intéressent à l'édition de la BRDF. Dans le cas des scènes en éclairage global ayant une géométrie complexe, des BRDF physiquement réalistes et une carte d'environnement, le calcul d'une image prend plusieurs minutes. Or, les paramètres d'une BRDF complexe sont peu intuitifs, et cette approche requiert un retour visuel immédiat de l'apparence. L'édition de ces BRDF devient alors trop laborieuse pour être envisageable à grande échelle. Une solution habituelle à ce problème est d'utiliser une scène simplifiée qui produit plus rapidement un résultat proche du résultat final. Cependant, comme la scène est complexe, les effets coûteux d'éclairage global comme les multiples réflexions spéculaires et diffuses ont un impact majeur sur l'apparence. L'utilisation d'une scène simplifiée pour l'édition de ces matériaux devient alors problématique car l'artiste ne pourra pas contrôler ces effets. La méthode de Ben-Artzi consiste à accélérer

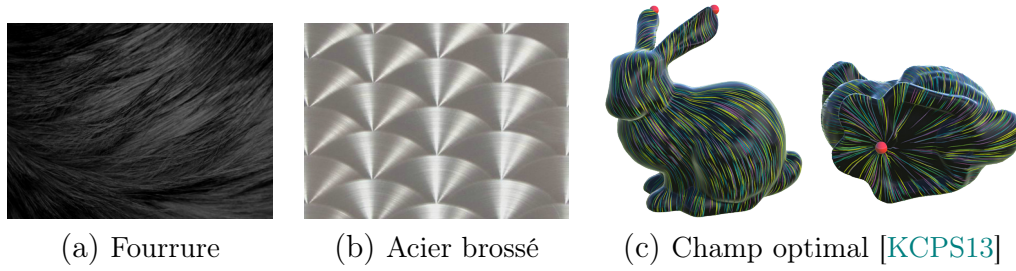


FIGURE 2.9 – Les contraintes physiques sur (a) les fibres d’une fourrure sont différentes de celles de (b) l’acier brossé. Elles se répercutent sur les contraintes du champ d’anisotropie qui caractérise donc aussi le matériau. (c) Les contraintes sur le champ de vecteur peuvent être contrôlées et permettent de mieux exprimer l’apparence.

suffisamment le rendu entre chaque édition de matériaux pour que le retour visuel soit immédiat. Pour cela, la géométrie, la lumière et le point de vue sont fixés. L’équation du rendu est donc réécrite pour pouvoir intégrer un lourd pré-calcul de transfert de radiance. La solution permet d’avoir un lien linéaire entre les paramètres de la BRDF et l’image finale. Dans notre contexte d’édition des matériaux anisotropes, la BRDF d’ashikhmin [AS00] est convertie pour pouvoir être utilisée dans ce modèle. Néanmoins, même si les paramètres de la BRDF anisotropes sont gérés, la direction de l’anisotropie définie sur la surface n’est pas éditable.

Édition de champ de tangentes Lorsque le matériau est anisotrope, l’orientation de la BRDF correspondante influe sur l’apparence. Le champ de vecteurs d’orientations de la BRDF est donc un degré de liberté sur l’apparence qui doit être défini. La paramétrisation d’une surface et la création de champs de vecteurs entraînent de nombreuses problématiques géométriques. Les méthodes de création de champs de vecteurs tangents optimisés sont nombreuses [ZMT06, FS07, CDS10, KCPS13]. Bien que certaines surfaces ne puissent pas empêcher la présence de singularités où le vecteur est indéfini, l’objectif de ces méthodes est de proposer des outils de haut niveau pour la création d’un champ lisse. L’utilisateur pourra, suivant les méthodes, définir l’emplacement des singularités, contraindre la direction de certains vecteurs sur des points donnés ou même imposer des contraintes sur les variations de directions à la surface. Dans le cas des matériaux anisotropes, l’orientation de la BRDF est liée à sa micro-surface, elle correspond par exemple à la direction des poils dans le cas de la BRDF d’une fourrure. Cette micro-surface est la source de contraintes physiques fortes qui caractérisent le matériau. Dans le cas de la fourrure, les poils seront faiblement courbés et il y a un minimum de singularités (voir figure 2.9(a)) tandis que dans le cas d’un métal brossé la courbure peut être plus forte et beaucoup de singularités peuvent apparaître

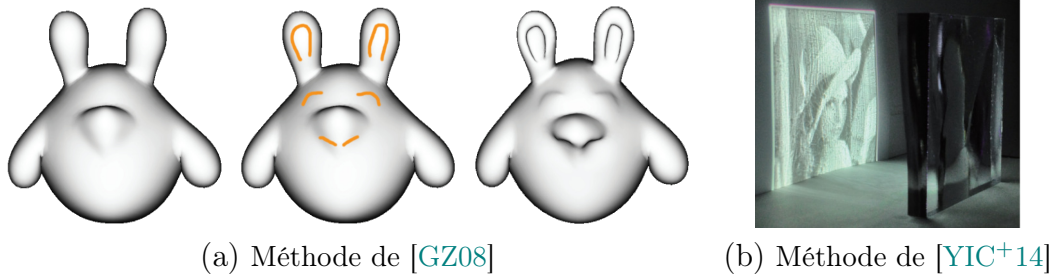


FIGURE 2.10 – Même si ces méthodes s’appuient sur l’édition de l’apparence, elles sont surtout des outils de modélisation. (a) La méthode de Gingold permet de dessiner des détails géométriques à partir des variations d’intensité des ombrages. (b) La géométrie de la plaque est finement conçue pour provoquer l’apparition d’un reflet caustique représentant une image lorsque la lumière passe au travers de l’objet.

(voir figure 2.9(b)). Les méthodes de création optimisées de champs de vecteurs contraints contribuent à la définition de l’apparence des matériaux anisotropes (voir figure 2.9(c)). Cependant, ils ne sont pas contraints spécifiquement par les effets de l’anisotropie sur l’apparence.

2.3.2 Approche inverse

Cette section décrit les outils de contrôle qui permettent d’éditer l’apparence dans l’image plutôt que dans la scène. Ces outils proposent donc une approche inverse qui peut s’exprimer de la manière suivante : trouver quels sont les paramètres de la scène qu’il faut modifier pour obtenir l’apparence décrite par l’artiste. Cette approche inverse nécessite une meilleure connaissance de la scène et surtout du lien qui unit les différents éléments avec l’apparence finale.

Forme

Lors de la synthèse d’images, la création d’une scène commence la plupart du temps par la modélisation de sa géométrie. Les différents objets qui vont la constituer sont modélisés par l’artiste. Beaucoup d’outils de bas niveau permettent la modélisation et l’édition de la géométrie [fou, Pix, tF, Aut]. Gingold et Zorin [GZ08] proposent un nouvel outil de modélisation qui se base sur l’apparence de l’objet. L’utilisateur dessine localement les ombrages qu’il veut voir apparaître à la surface d’un objet et ce dernier change de forme pour que l’ombrage apparaisse (voir figure 2.10 (a)). La métaphore du dessin ou la déformation des reflets fournissent à l’utilisateur un outil pour l’édition de l’apparence finale. Retrouver une forme depuis l’apparence est un problème difficile qui nécessite un environnement contrôlé [Hor70, ZTCS99]. L’édition se

fait donc dans une scène simplifiée où il n'y a qu'une lumière directionnelle et où le matériau de l'objet édité est représenté par la BRDF de Phong. Bien qu'elle utilise l'apparence, l'objectif de la méthode est de modifier la forme des objets.

Les caustiques correspondent à la forte concentration de rayons lumineux sur une surface de taille limitée. Contrôler l'apparence d'une caustique est difficile car elle se crée en fonction de la configuration géométrique de la surface qui reflète ou réfracte la lumière pour produire la concentration des rayons. Certaines méthodes de création de surfaces proposent une approche inverse du problème [PPV07,FDL10,PJJ+11,KEN+13,YIC+14] : étant donné une image correspondant à l'apparence voulue d'une caustique, quelle est la géométrie qui permet de la générer (voir figure 2.10 (b)) ? L'image cible sert à connaître la densité lumineuse reçue en tout point du receveur. La surface de réfraction est alors représentée par un champ de hauteur discrétisé de résolution supérieure ou égale à celle de l'image. Cette discrétisation permet de créer des *facettes* qui sont orientées à l'aide d'une minimisation globale pour correspondre aux contraintes imposées par l'image cible.

Éclairage

Dans le cas d'un éclairage discret, le comportement des lumières est prévisible et il est souvent préférable de modifier les paramètres des lumières manuellement jusqu'à converger vers l'apparence désirée. Plus difficile à contrôler, l'éclairage basé image comme les cartes d'environnement a donné lieu à des méthodes d'édition par l'apparence pour faciliter la création et la modification des cartes d'environnement.

La méthode d'Illumination Brush [OMSI07] apporte une solution pour la création et la modification d'une carte d'environnement. À partir d'une carte d'environnement initiale, l'utilisateur peint des reflets d'intensité et de couleur indiqués directement sur l'objet (voir figure 2.11 (a)). Selon les informations d'apparence fournies par cette interaction, l'outil va trouver les modifications à effectuer sur la carte d'environnement (voir figure 2.11 (b,c)). Comme la lumière est éditée, la forme et le matériau sont fixés et connus. Comme l'édition se fait sur la carte d'environnement qui agit sur toute la scène, il est possible que des éditions provoquent des changements non voulus sur une autre partie de l'objet. Il faut donc que l'utilisateur puisse avoir un retour visuel immédiat des modifications apportées. Pour cela, Illumination Brush utilise une approche similaire à l'article de Ben-Artzi [BAEDR08] en pré-calculant la fonction de transfert de radiance. Le système EnvyLight [Pel10] apporte une solution plus globale à l'édition de cartes d'environnement. À partir d'un rendu

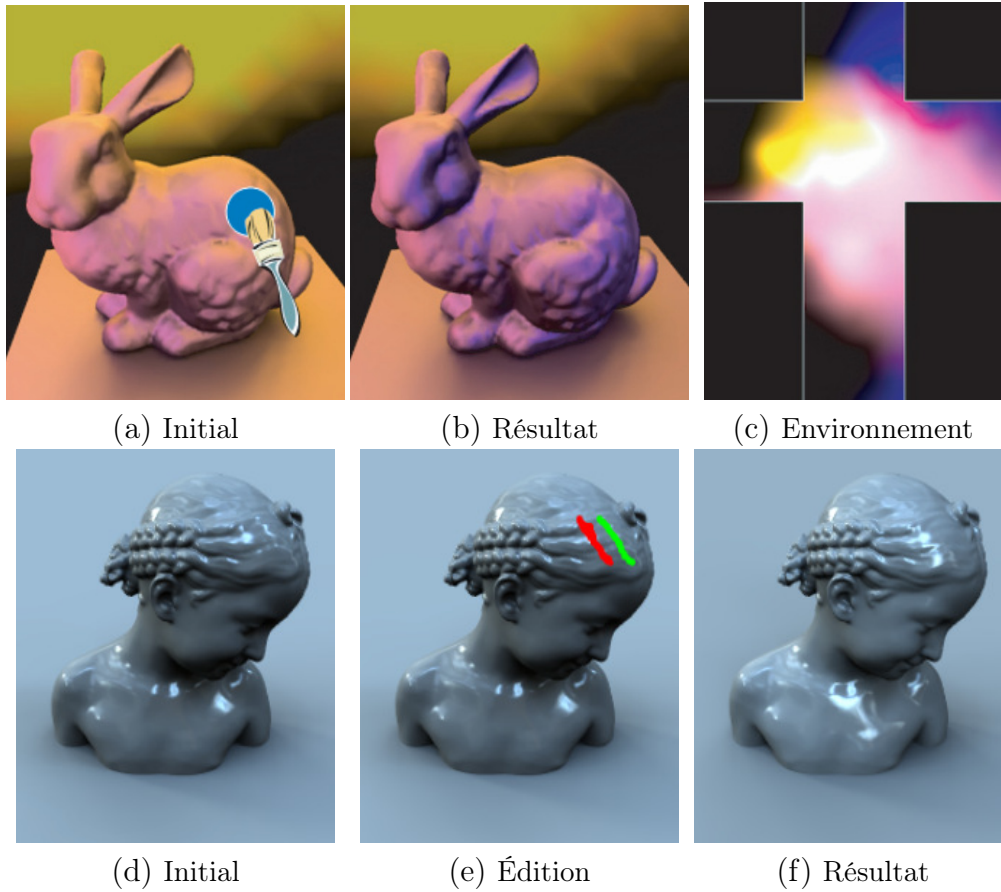


FIGURE 2.11 – La méthode d’Illumination Brush [OMSI07] utilise (a) la métaphore de la brosse pour donner l’impression (b) de *peindre* les reflets tandis que c’est (c) la carte d’environnement qui est éditée. (d) A partir d’un premier résultat, (e) et des contraintes sous forme de traits, la méthode EnvyLight [Pel10] permet (f) de déplacer le reflet en modifiant la carte d’environnement.

initial (voir figure 2.11 (d)), l'utilisateur va poser des contraintes en utilisant un système d'annotations visuelles sur l'image (voir figure 2.11 (e)). La carte d'environnement est modifiée en fonction de ces contraintes pour correspondre à l'apparence (voir figure 2.11 (f)). Il est possible de changer la luminosité, la teinte, le contraste, la netteté et la position des reflets et des ombres. Cette méthode fait des hypothèses sur le matériau pour pouvoir trouver efficacement la position dans la carte d'environnement qu'elle devra éditer pour faire apparaître des reflets à l'endroit sélectionné. L'une de ces hypothèses est de considérer un matériau isotrope rendant impossible l'utilisation de la méthode pour éditer les reflets anisotropes.

Matériau

Lorsque la BRDF utilisée provient de données mesurées, il est difficile d'en éditer le contenu. AppWand [PL07] est un outil d'édition des BRDF mesurées permettant une navigation dans l'espace des BRDF. La méthode définit les paramètres de couleur du diffus, luminosité et brillance visuellement intuitifs lors de l'édition du matériau. Ces paramètres sont donnés au système en peignant des traits sur l'objet. Les deux contributions de la méthode sont de faire correspondre les paramètres à des modifications de données et d'utiliser le système des traits peints pour propager l'édition dans les bonnes régions. Les contraintes sont ainsi appliquées aux données à chaque itération jusqu'à ce que l'apparence obtenue converge vers l'apparence désirée.

BRDF shop [CPK06] est un outil d'édition de matériaux. Le système s'appuie sur le cas d'une scène simple constituée d'une sphère et d'une lumière directionnelle. Interactivement, à l'aide de différentes brosses, l'utilisateur dessine et modifie des reflets sur la sphère. Une variante du modèle de BRDF de Ward [War92] est alors paramétrée pour correspondre au matériau qui reproduirait au mieux cette apparence. Les outils d'édition sont ici directement liés aux lobes de la BRDF : les outils de création de reflets et d'anisotropie permettent de créer les lobes isotropes et anisotropes tandis que les outils de rugosité et d'égénéralisation réduisent leur taille. Malgré le retour visuel temps réel dans les scènes de l'article, cette approche ne permet pas une édition efficace de la scène car la définition de l'apparence est réalisée dans le cadre d'une scène très simplifiée.

Chemins lumineux

A la frontière entre l'édition de scène et la composition d'images, la méthode de Ritschel et al. [ROTS09] permet d'éditer localement les réflexions sur les objets. Ces réflexions sont normalement le résultat de l'interaction du matériau avec le reste de la scène. A partir de la réflexion spéculaire initiale, la méthode

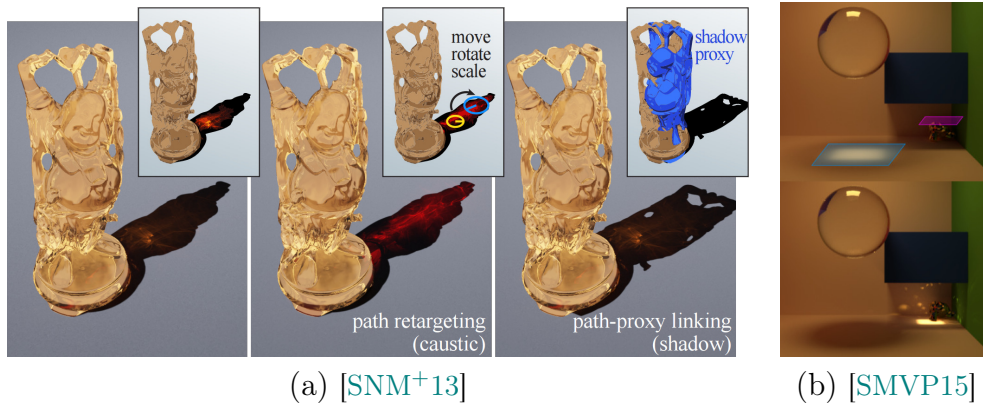


FIGURE 2.12 – Les méthodes d'édition des chemins lumineux. (a) La méthode de Schmidt permet d'éditer directement l'apparence tandis que (b) la méthode de Subileau permet de créer un filtre de chemins (en bleu) qui subiront des transformations (en rose). Ici les rayons caustiques sous la sphère sont déplacés sous le cube noir.

fournit des outils pour modifier la direction de réflexion. Cette méthode fonctionne sur tous les types de matériaux mais son intérêt se trouve lorsque la réflexion est spéculaire car l'apparence sera plus détaillée. Lors de l'édition, pour un point de vue donné, l'utilisateur peut modifier la cible d'une réflexion. Cette modification se répercute dans la scène sous la forme d'une exception du transport lumineux où la direction de réflexion sera localement faussée. Cette approche n'est pas physiquement réaliste mais correspond à une édition artistique du reflet. Seule la forme de l'objet sur lequel s'appuie la réflexion doit être fixée et connue. LightWarping [VPB⁺09] est un autre outil spécifique utilisant l'édition des rayons lumineux. A partir des informations de courbure d'une image initiale, les chemins lumineux sont alors déformés pour accentuer ou diminuer l'apparence des détails à la surface de l'objet. Dans ces méthodes, le matériau n'a pas besoin d'être spécifié. Cependant, les méthodes sont bâties sur l'hypothèse d'un matériau isotrope, le cas de l'anisotropie pouvant conduire à un comportement imprévisible.

Dans le cadre de l'éclairage global, les différents chemins lumineux peuvent être triés selon des caractéristiques potentiellement liées à l'apparence, comme le nombre et le type de rebonds (ex : caustique) ou la couleur. En se basant sur ce tri, il est possible d'isoler un sous-ensemble de rayons, et d'en modifier le comportement pour changer l'apparence finale. Dans l'approche de Schmidt et al. [SNM⁺13], l'utilisateur peut alors transformer des éléments de l'apparence comme un reflet caustique ou une ombre (voir figure 2.12 (a)). A partir de l'élément sélectionné, les chemins lumineux qui la provoquent sont sélectionnés puis modifiés pour correspondre à la transformation de l'apparence

désirée. Dans la méthode de Subileau [SMVP15], l'approche est plus directe. De nouvelles entités, les portails, sont ajoutés à la scène. Les portails d'entrées correspondent à des filtres de chemins lumineux tandis que les portails de sorties correspondent à leurs transformations (voir figure 2.12 (b)). Combinés à un retour visuel simplifié rapide, ces outils permettent à l'artiste de contrôler l'apparence de la scène directement, sans avoir à se soucier de la réalité physique des transformations. Les réflexions des matériaux anisotropes peuvent être éditées avec cette méthode mais comme elle ne prend pas spécifiquement en compte les propriétés de l'anisotropie, cette édition reste toujours difficile à prédire.

Résumé En s'appuyant sur les liens entre les différents éléments de la scène et l'apparence finale, les outils présentés permettent un contrôle direct de l'apparence finale (et donc indirect de la scène). Néanmoins, seul *BRDF-shop* traite spécifiquement l'anisotropie des matériaux, et il le fait dans une scène simplifiée. De plus, en éditant la BRDF directement, il la découple de sa signification géométrique et prend le risque de produire une apparence non réaliste. Aucune de ces méthodes ne proposent de se servir du champ d'orientation de la BRDF comme degré de liberté pour modifier l'apparence. L'orientation des BRDF anisotropes est un degré de liberté supplémentaire pour le contrôle mais il n'est pas exploité à cause du manque de compréhension de son comportement. Le chapitre 4 présente un outil qui se base sur la compréhension des reflets de matériaux anisotropes pour fournir un outil d'édition de l'apparence en utilisant les champs d'orientation de la BRDF comme degré de liberté.

Chapitre 3

SV-BRDF multi-échelles pour l'apparence des matériaux brossés

Ce chapitre est basé sur l'article que nous avons présenté à SIGGRAPH 2016 [RGB16]. Il présente un modèle adapté à la représentation des matériaux brossés et rayés. A l'inverse des derniers travaux dans le domaine très spécifique de la représentation des matériaux structurés, notre méthode utilise les propriétés des rayures pour améliorer considérablement le temps de rendu et réduire la quantité de mémoire nécessaire. Elle permet ainsi d'obtenir des temps de rendu suffisamment courts pour permettre à l'utilisateur de naviguer interactivement dans la scène. La figure 3.1 présente des photos d'objets métalliques montrant les effets que nous reproduisons.

Effets des matériaux brossés

La figure 3.1 (a) montre un métal finement brossé observé à une distance suffisante pour être quasiment homogène. Les reflets de l'environnement apparaissent étirés à cause de l'anisotropie du matériau. Le métal brossé de la figure 3.1 (b), plus grossier, laisse apparaître les rayures plus distinctement. Elles deviennent particulièrement visibles aux bords des reflets où la silhouette varie fortement tandis qu'elles sont presque indiscernables dans les parties moins lumineuses. Dans les travaux précédents, seuls les articles de Dong [DWMG15] et Yan et al. [YHJ⁺14, YHR16] sont capables d'imiter ces effets.

La figure 3.1 (c) montre un métal fortement rayé dans toutes les directions. Ces rayures provoquent l'apparition de lignes scintillantes sur la surface. Sur l'image, les lignes paraissent former des cercles scintillants autour des reflets spéculaires. Ces lignes semblent apparaître en formant des cercles concentriques autour d'un reflet spéculaire principal. Lorsque le point de vue change ces cercles donnent l'illusion de se déplacer avec le reflet spéculaire. Alors que la surface est complètement recouverte de rayures dans toutes les directions, ces

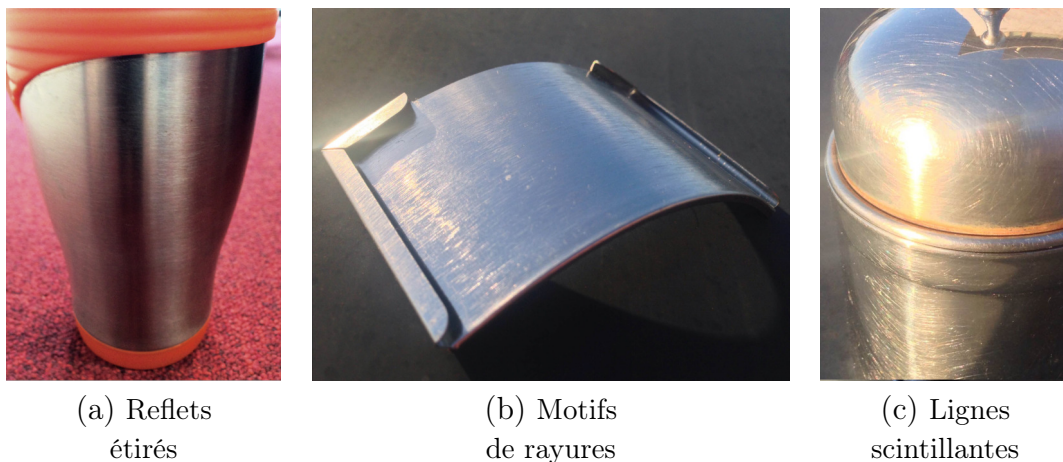


FIGURE 3.1 – Un métal brossé va provoquer un étirement du reflet de l’environnement (a) tandis qu’un point de vue suffisamment proche fera apparaître des motifs de rayures aux bords des reflets (b). Les rayures apparaissent sous la forme de lignes scintillantes (c) qui se comportent comme des cercles concentriques autour des reflets lorsque le point de vue s’éloigne.

lignes scintillantes ne représentent que l’infime partie qui réagit fortement à la source de lumière responsable du reflet spéculaire. C’est cet effet, typique de l’apparence des rayures, qui entraîne une difficulté de représentation efficace de ces matériaux. Il est en effet essentiel de déterminer rapidement les rayures qui seront importantes pour la réflexion avant de prédire de manière physiquement plausible leur comportement. Actuellement, seules les méthodes de Yan et al. [YHJ⁺14, YHR16] sont capables de produire ce genre d’effets à partir d’une carte de normales de très haute résolution et d’une importante structure de données.

Les figures précédentes utilisent le cas représentatif des métaux pour montrer les effets remarquables des rayures à la surface d’un objet. Ces effets ne sont toutefois pas limités aux métaux. La figure 3.2 présente trois matériaux rayés qui ne sont pas des métaux. La peinture d’une voiture est composée de nombreuses couches. Les couches les plus superficielles sont souvent des vernis brillants. Lorsque les véhicules sont lavés avec des rouleaux, des micro-rayures apparaissent sur ce vernis. La figure 3.2 (a) montre les lignes scintillantes produites par les micro-rayures à la lumière très intense du soleil. Le bois vernis de la figure 3.2 (b) présente un comportement similaire avec des rayures plus larges. Une vitre rayée possède également des rayures visibles (figure 3.2 (c)) mais cette fois-ci par transparence.

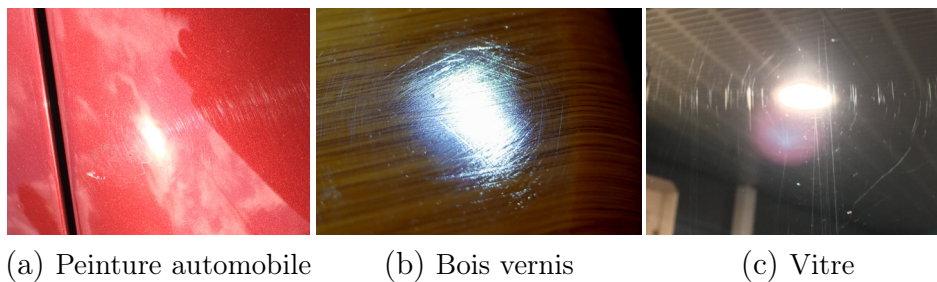


FIGURE 3.2 – Les matériaux initialement polis ou brillants présentent des motifs de rayures circulaires lorsqu'ils ont été frottés dans de nombreuses directions, souvent à cause d'un nettoyage trop fort. La largeur, la longueur et la densité des rayures peuvent varier fortement.

Modèle de SV-BRDF

Comme l'ont montré les articles de Mérillou [MDG01] et Dong [DWMG15], la BRDF d'une rayure est très anisotrope et possède de hautes fréquences angulaires. Ces contraintes ont d'ailleurs motivé la création de modèles spécifiques pour les rayures afin de les représenter plus précisément. Bien qu'il soit possible de concevoir un point de vue suffisamment distant pour considérer une surface brossée comme homogène, ce n'est pas le cas dans la majorité des situations rencontrées. Habituellement, les objets sont brossés de manière suffisamment grossière pour que les variations spatiales soient visibles et l'utilisation d'une BRDF ne suffit pas. Si le matériau est rayé, il est alors par définition non-homogène et nécessite de prendre en compte les paramètres de positionnement de la rayure pour qu'elle puisse être représentée.

Le modèle que nous proposons est un modèle de SV-BRDF spécifique pour les matériaux brossés et rayés. Le SV placé devant le terme BRDF fait référence à l'ajout des variations spatiales. La BRDF est calculée et évaluée efficacement grâce à l'exploitation des propriétés spécifiques des rayures. Nous tirons profit de l'indépendance des rayures les unes par rapport aux autres afin de simplifier la gestion des variations spatiales et d'en offrir un contrôle haut niveau. Enfin, nos hypothèses et notre implémentation permettent d'obtenir un modèle suffisamment efficace pour être utilisé dans le cadre du rendu interactif et suffisamment contrôlable pour reproduire tous les effets que nous avons observés dans les figures précédentes.

3.1 Aperçu de notre approche

Contrairement aux travaux précédents, notre approche est spécifiquement adaptée à la modélisation et au rendu des matériaux brossés et rayés. La

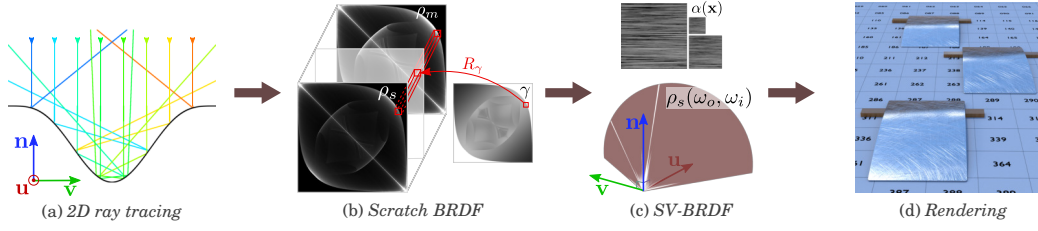


FIGURE 3.3 – (a) La BRDF pour une seule rayure miroir est simulée avec un lancer de rayon 2D (chaque rayon possède sa propre couleur pour faciliter la lecture de l’image). (b) La BRDF complète 3D avec l’effet Fresnel est approximée en utilisant l’interpolation entre deux BRDF 2D contrôlées par une carte de coefficient γ . (c) Lors du rendu, la SV-BRDF est construite par une combinaison linéaire de BRDF de rayure (bas) en fonction de l’aire relative de chaque rayure dans l’empreinte du pixel ou du rayon (haut). (d) Le modèle de SV-BRDF est efficacement évalué à multiples échelles, permettant d’afficher de grandes variations spatiales et angulaires.

difficulté consiste à gérer les hautes fréquences spatiales dues à la finesse des rayures mais aussi les hautes fréquences angulaires des profils de rayures qui donnent un comportement anisotrope complexe.

D’une part, notre modèle de BRDF de rayure s’appuie sur des primitives de rayures caractérisées par leur profil. D’autre part, l’utilisation d’un profil explicite pour la création de la BRDF s’apparente à des approches basées sur les données comme le décrit la section 3.2. La BRDF d’une seule rayure est *simulée* en utilisant un algorithme de lancer de rayon 2D (figure 3.3 (a)), incluant les inter-réflexions et une atténuation de Fresnel réaliste. Grâce à une paramétrisation spécifique inspirée par le cône de réflexion miroir de Kajiya [KK89], le résultat est stocké dans une texture 2D (figure 3.3 (b)).

La prise en compte des variations spatiales est alors ajoutée pour définir une SV-BRDF (figure 3.3 (c)). Elle est obtenue par une *combinaison linéaire* de BRDF de rayure (bas) conduite par l’aire des rayures sous l’empreinte d’un pixel ou d’un rayon (haut). La section 3.3 détaille les méthodes d’évaluation d’une source lumineuse, d’échantillonnage préférentiel et de rendu multi-échelles pour des éclairagements directs ou globaux (figure 3.3 (d)).

3.2 Modèle de matériau

Hypothèses Nous définissons une rayure comme étant l’extrusion d’un profil 1D creusé dans une surface de base. Nous ne considérons pas d’intersections entre les rayures dans notre modèle. Comme dans les travaux précédents, la

surface de base est considérée plane localement, de même les rayures sont localement droites. Nous définissons une couche de rayures comme un ensemble de rayures parallèles. En d'autres termes, la courbure de la surface et les variations des directions de rayures (divergence et courbure géodésique) sont considérées négligeables par rapport à l'échelle de la rayure. Ces conditions permettent de s'assurer que les inter-réflexions sont confinées à l'intérieur des rayures. Autrement dit, les rayons qui sortent d'une rayure ne pourront pas y rentrer de nouveau. La section 3.3.3 montre comment traiter les profils de rayures lorsqu'ils ne sont pas entièrement creusés dans la surface. La micro-BRDF à l'intérieur des rayures est restreinte à un réflecteur miroir de Fresnel tandis que la micro-BRDF du matériau de base peut être choisie librement.

Les résultats présentés dans la section 3.4 montrent que ces hypothèses permettent d'obtenir une large gamme de matériaux basés sur des profils et des distributions de rayures variés. Ces hypothèses permettent surtout de créer un modèle de SV-BRDF multi-échelles, compact et efficace à évaluer.

3.2.1 BRDF Miroir

Comme les inter-réflexions sont confinées dans chacune d'elles, les rayures peuvent être considérées indépendantes les unes des autres. Il est donc possible de trouver la BRDF correspondant à chaque rayure. Comme illustré à la figure 3.4 (a), une propriété importante d'une rayure idéalement extrudée depuis un profil est que les réflexions issues d'une même source lumineuse sont contenues dans un demi-cône autour de la direction de la rayure \mathbf{u} . Cette propriété a été initialement observée pour des fibres par Kajiya [KK89]. L'ouverture de ce cône dépend de l'élévation de la vue. De la même manière, nous identifions la famille de cônes en exprimant le vecteur unitaire $\boldsymbol{\omega}$ sur l'hémisphère grâce aux coordonnées angulaires $(\theta, \phi) \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]^2$ données par :

$$(\theta, \phi) = (\sin^{-1}(\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{u}), \text{atan2}(\boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{v}, \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{n})),$$

où \mathbf{n} est la normale de la surface et $\mathbf{v} = \mathbf{u} \times \mathbf{n}$ est le vecteur orthogonal à \mathbf{u} et \mathbf{n} afin de compléter le repère tangent à la surface.

Soit $\rho_m(\theta_{out}, \phi_{out}, \theta_{in}, \phi_{in})$ la BRDF d'une rayure dans cette paramétrisation, où l'indice m signifie miroir et les indices in et out font respectivement référence aux directions incidentes (incoming) et sortantes (outgoing). Le demi-cône de réflexion implique que pour une direction de vue, seules les lumières appartenant à l'iso-courbe $\theta = -\theta_{out}$ vont contribuer (en violet dans la figure 3.4 (b)). Donc ρ_m sera nulle dans tous les cas où $\theta_{in} \neq \theta_{out}$ et la BRDF peut ainsi être réduite de 4 dimensions à 3. De plus, comme nous avons défini la rayure comme l'extrusion d'un profil, la variation de l'élévation de la vue ou de la lumière le long de la direction de la rayure (i.e., θ_{out} ou θ_{in}) ne changera pas le

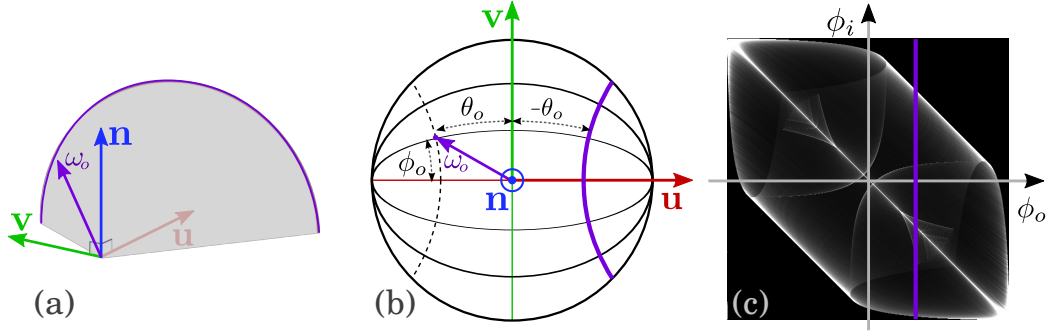


FIGURE 3.4 – (a) Pour une rayure miroir alignée avec \mathbf{u} , la lumière est réfléchiée dans une direction sortante ω_o qui se trouve dans un demi-cône de directions (en violet). (b) Une direction peut être exprimée dans les coordonnées de la rayure (θ, ϕ) , le demi-cône est alors une isocourbe de θ . (c) La BRDF miroir est donc réduite aux deux dimensions ϕ_i et ϕ_o .

comportement de la BRDF le long du cône. Par conséquent, ρ_m est invariant selon θ et la BRDF peut être simplifiée en une fonction 2D :

$$\rho_m(\theta_{out}, \phi_{out}, \theta_{in}, \phi_{in}) = \begin{cases} \rho_m(\phi_{out}, \phi_{in}) & \text{si } \theta_{in} = -\theta_{out}, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (3.1)$$

Cette réduction de dimension permet de rapidement pré-calculer une version discrète et compacte de la BRDF d'une rayure en utilisant une grille 2D $M \times M$ de paramètres ϕ_{out} et ϕ_{in} (voir figure 3.4 (c)) qui sera remplie à l'aide d'un lancer de rayon et d'une estimation de densité. Le seul paramètre de cet algorithme est la fonction du profil de la rayure dont des exemples sont montrés dans la figure 3.5. Pour chaque valeur discrète de ϕ_{in} , $N \gg M$ rayons sont envoyés sur des positions aléatoires le long du profil de rayure, un tracé récursif de ces rayons est alors exécuté dans la rayure jusqu'à ce qu'ils ressortent dans une direction ϕ_{out} . La quantité relative de rayonnement $\frac{M}{N \cos(\phi_{out})}$ est alors accumulée dans la case de la grille correspondante, où $\cos(\phi_{out})$ représente le classique terme géométrique. Grâce aux propriétés des θ citées plus haut, les calculs peuvent être effectués dans le plan 2D du profil de la rayure (voir figure 3.3 pour une illustration), lorsque $\theta_{in} = \theta_{out} = 0$, et ainsi réduire la complexité de la simulation.

Par construction, la BRDF de la rayure assure la conservation d'énergie mais aussi la réciprocité d'Helmholtz à une imprécision numérique près. Dans notre paramétrisation, cette réciprocité implique $\rho_m(\phi_{out}, \phi_{in}) = \rho_m(\phi_{in}, \phi_{out})$, ce qui correspond à une symétrie le long de la diagonale du domaine 2D. Pour des profils de rayures symétriques, la BRDF possède une symétrie supplémentaire

le long de l'anti-diagonale. Ces deux symétries sont exploitées pour obtenir jusqu'à quatre fois les nombres de rayons accumulés sans surcout.

La figure 3.5 décrit le comportement de ρ_m lorsque le profil de rayure est modifié. Les couleurs permettent de visualiser l'importance des inter-réflexions et de localiser les différents modes de réflexion. Lorsque la rayure est plus profonde, le nombre d'inter-réflexions augmente et de nouveaux modes apparaissent depuis le centre de la grille. Lorsque la rayure est superficielle, seule la ligne de réflexion sur l'anti-diagonale (où $\phi_{in} = -\phi_{out}$) reste. Cette configuration correspond à la réflexion dans la direction miroir. Le cas d'une rayure en V montre également des lignes de réflexion mais elles sont décalées de la diagonale et de l'anti-diagonale car elles correspondent aux parois inclinées de la rayure.

3.2.2 BRDF Complète

Dans la section précédente, nous avons représenté les rayures en considérant leur surface composée de miroirs parfaits. Le modèle de BRDF Miroir ρ_m est donc idéalisé car il ne prend pas en compte l'effet d'atténuation des réflecteurs miroirs de Fresnel. Cette section permet d'expliquer comment l'atténuation due au terme Fresnel est ajoutée pour obtenir un modèle de BRDF de rayure physiquement plausible. En pratique, nous avons simulé la BRDF de rayure 3D ρ_s avec s signifiant *scratch*.

Dans la théorie des micro-facettes, seul le premier rebond de lumière sur la micro-surface est considéré. Cette approximation permet de rendre le terme de Fresnel indépendant, qu'il suffit alors de multiplier avec la BRDF idéalisée. Dans notre cas, considérer les inter-réflexions à l'intérieur de la rayure complexifie notre modèle car l'intensité le long des chemins lumineux doit être atténuée à *chaque* réflexion. Comme cette atténuation dépend de l'angle θ entre le rayon et la normale 3D d'une micro-facette, un modèle de BRDF de rayure qui inclut l'effet de Fresnel ne peut alors plus être représenté seulement en 2D.

Pour avoir une meilleure idée de l'influence de l'effet de Fresnel, nous avons simulé la BRDF de rayure en 3D en ajoutant l'angle θ_{out} dans les paramètres et en calculant l'atténuation de Fresnel lors des réflexions en utilisant l'approximation de Shlick [Sch94] pour les matériaux diélectriques, ou l'approximation de Laznyi et al. [LSK05] pour les matériaux conducteurs. En pratique, nous avons simulé la BRDF de rayure 3D $\rho_s(\theta_{out}, \phi_{out}, \phi_{in})$ en utilisant notre programme de tracé de rayons sur un ensemble de valeurs θ_{out} que nous avons stockées dans une grille 3D. Pour mieux comprendre les variations dans la dimension de θ_{out} , nous avons affiché les courbes d'évolution de la réflectance

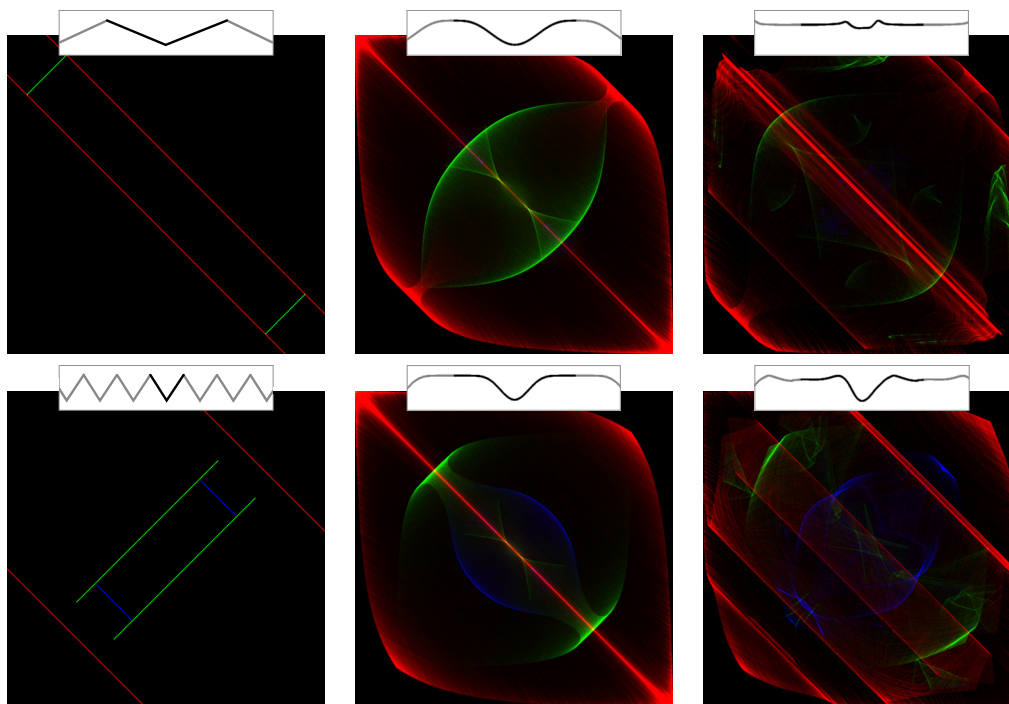


FIGURE 3.5 – Le profil de rayure (haut) et les BRDF miroirs correspondantes (bas). Le rouge, le vert et le bleu représentent respectivement le premier, le deuxième, et trois rebonds ou plus. Gauche : Une paire de profils en V entraîne des lignes de réflexion qui s'éloignent de la diagonale de réflexion miroir. Le profil le plus abrupt permet d'atteindre un nombre plus élevé de rebonds. Centre : Une paire de profils basés sur une fonction quartique symétrique entraîne une BRDF symétrique sur les deux diagonales. Droite : Une paire de profils mesurés entraînent des BRDF plus complexes avec une seule symétrie due à la réciprocité de Helmholtz. Bien que le profil de la quartique profonde (en bas au centre) et le profil mesuré profond (en bas à droite) semblent avoir la même allure, leurs BRDF sont très différentes. En particulier, le pique sur l'anti-diagonale (correspondant à la réflexion miroir) est absent dans la BRDF à droite à cause du manque de portions plates sur le profil.)

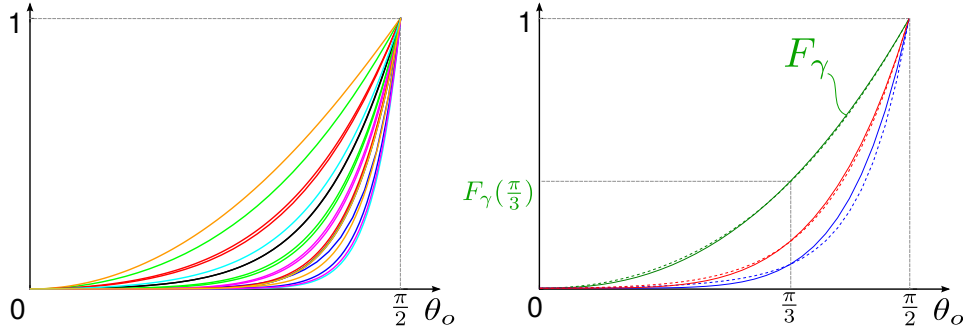


FIGURE 3.6 – Gauche : Un sous-ensemble des courbes de réflectance en fonction de θ_o et pour des paires (ϕ_o, ϕ_i) fixées, où les valeurs ont été linéairement remappées dans l'intervalle $[0, 1]$. Droite : Notre approximation F_γ (lignes pleines) pour trois courbes mesurées (lignes pointillées).

pour une paire donnée (ϕ_{out}, ϕ_{in}) (voir figure 3.6 gauche) que nous avons transformées linéairement dans l'intervalle $[0, 1]$.

L'image de droite de la figure 3.6 montre que les courbes de réflectance transformées peuvent être bien approchées par une fonction puissance de la forme $F_\gamma(\theta_{out}) = \left(\frac{2|\theta_{out}|}{\pi}\right)^\gamma$. Cette fonction est contrôlée par son seul coefficient γ qui sera utilisé afin d'approcher au maximum chaque courbe de réflectance. Bien qu'une approche naïve serait de calculer γ à l'aide d'une minimisation non-linéaire, il est possible de trouver directement la solution : Pour chaque paire (ϕ_{out}, ϕ_{in}) , nous calculons ρ_s pour les deux valeurs extrêmes $\theta_{out} = \{0, \frac{\pi}{2}\}$ qui nous permettent de transformer linéairement la courbe dans l'intervalle $[0, 1]$. Nous calculons également ρ_s pour $\theta_{out} = \frac{\pi}{3}$ que nous utilisons pour inverser $F_\gamma(\frac{\pi}{3})$ et obtenir l'exposant γ . Nous avons choisi de ne pas calculer la formule exacte de Fresnel dans notre approche car le gain de précision obtenu serait perdu à cause de notre méthode d'approximation basée sur une fonction puissance monotone.

La BRDF de rayure 3D ρ_s est alors approchée en utilisant un simple mélange linéaire de la forme suivante :

$$\rho_s(\omega_{out}, \omega_{in}) \approx F_\gamma(\theta_{out}) \rho_s(\frac{\pi}{2}, \phi_{out}, \phi_{in}) + (1 - F_\gamma(\theta_{out})) \rho_s(0, \phi_{out}, \phi_{in}), \quad (3.2)$$

où γ est l'abréviation de $\gamma(\phi_{out}, \phi_{in})$. Le mélange est illustré à la figure 3.3 (b).

Il peut être facilement démontré que l'équation 3.2 assure la réciprocité d'Helmholtz puisque aucun terme ne change lorsque θ_{out} est remplacé par $\theta_{in} = \theta_{out}$. Cette approximation permet d'éviter de simuler l'intégralité de la BRDF de rayure 3D. Il devient alors seulement nécessaire d'effectuer trois simulations

2D en variant $\theta_{out} = \{0, \frac{\pi}{3}, \frac{\pi}{2}\}$. De plus, comme seul θ_{out} est utile pour calculer l'équation de Fresnel, le chemin des rayons ne change pas et peut donc être calculé une seule fois en 2D comme dans la section 3.2.1. En plus du gain de performance, la simulation 2D du lancer de rayon permet d'éviter les problèmes d'imprécisions numériques qui se seraient produits en 3D lors du calcul pour $\theta_{out} = \frac{\pi}{2}$, qui est un cas limite car le rayon est théoriquement parallèle à la surface. Dans le cas où $F_\gamma(\frac{\pi}{2}) = 1$, la BRDF de rayure se comporte de la même manière que la BRDF miroir. Nous pouvons donc déduire que $\rho_s(\frac{\pi}{2}, \phi_{out}, \phi_{in}) = \rho_m(\phi_{out}, \phi_{in})$. En pratique, le modèle final de BRDF de rayure est donc un ensemble des trois fonctions 2D : $\rho_s(0, \phi_{out}, \phi_{in})$, $\rho_m(\phi_{out}, \phi_{in})$ et $\gamma(\phi_{out}, \phi_{in})$ qui peuvent être stockées dans les trois canaux d'une unique texture 2D.

Pour une direction donnée ω_{out} , une coupe de la BRDF de rayure correspond à une fonction 1D sur le demi-cône de réflexion, comme illustré à la figure 3.3 (c) (pointes blanches). Il est important de noter la séparation du mode spéculaire en plusieurs pointes qui sont causées par la forme du profil et les inter-réflexions décrites par [PK03].

Comparaisons Avant d'ajouter les variations spatiales au modèle de rayure, nous le comparons à deux autres BRDF anisotropes dans la figure 3.7 dans un cas de profils de rayures analytiques difficiles, la fonction quartique de la figure 3.11 (a). La simulation par un tracé de rayons complet prenant en compte l'atténuation de Fresnel nous permet de créer l'image servant de référence (figure 3.7 (f)) ainsi que les images de différence dans le coin inférieur droit de chaque résultat. Les coefficients de réfraction que nous avons utilisés pour cette figure, $n = 2.91$ et d'extinction $k = 3.09$, correspondent aux indices du fer pour une longueur d'onde de $650nm$. La figure 3.7 (a) correspond au modèle d'Ashikhmin-Shirley [AS00], que nous avons instancié avec les valeurs $n_u = 10^4$ et $n_v = 2$ afin de concentrer l'énergie dans le cône de réflexion et ainsi nous approcher au mieux d'un matériau brossé. Nous avons choisi le modèle d'Ashikhmin-Shirley, mais tous les modèles analytiques n'ayant qu'un seul lobe donneront des résultats similaires. La figure 3.7 (b) utilise une NDF tabulée pour correspondre aux travaux précédents [YHJ⁺14, DWMG15]. Pour obtenir la NDF tabulée, nous avons adapté l'algorithme de lancer de rayon sur une carte de normales décrivant les rayures à partir du profil utilisé pour la référence, la paramétrisation de la BRDF résultante reste alors pertinente. Nous avons ajouté un terme de Fresnel et un terme d'ombrage/masquage comme termes multiplicatifs afin de correspondre à la forme générale de la théorie des micro-facettes. La figure 3.7 (c) permet de montrer que la simulation de la BRDF de rayure, même limitée à un seul rebond, est déjà supérieure aux autres modèles (voir les images de différences) grâce à un meilleur traitement de l'ombrage et du masquage. Le modèle de BRDF de rayure complet permet de gérer les rebonds d'ordre supérieur. Comme le montre la figure 3.7

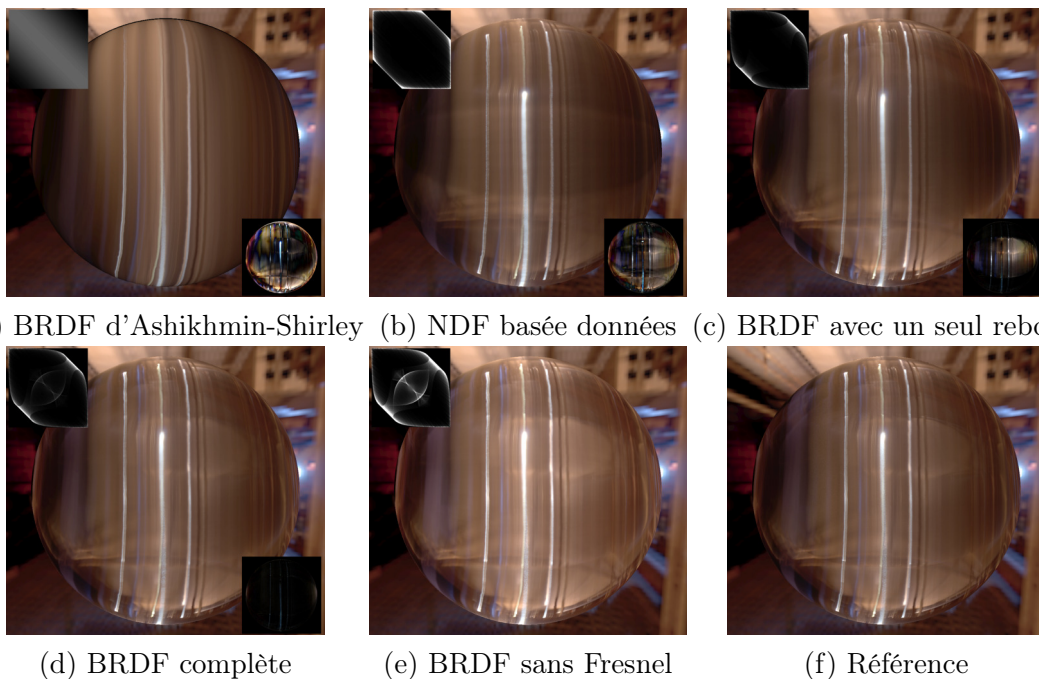


FIGURE 3.7 – Comparaison des modèles de BRDF anisotropes. L'encart en haut à gauche montre la BRDF pour $\theta_o = 0$ dans la paramétrisation présentée dans la section 3.2.1, l'encart en bas à droite est la différence avec la référence (magnifié 8 fois). (a) Le rendu fait avec la BRDF d'Ashikhmin-Shirley montre des réflexions uniformément étirées. (b) Utiliser une NDF basée sur les véritables données produit des étirements non uniformes plus réalistes. (c) Notre modèle de BRDF sans les inter-réflexions ressemble à (b), avec un meilleur terme de masquage et d'ombrage. (d) Ajouter les inter-réflexions produit un résultat quasiment identique à la référence en (f). (e) Les éléments dus aux inter-réflexions sont beaucoup plus forts lorsque l'effet Fresnel est désactivé.

(d), le résultat du modèle est indifférenciable de la référence. L'influence des inter-réflexions dépend du choix des coefficients de Fresnel, qui feront réduire l'intensité à chaque rebond successif. Cette atténuation devient plus évidente dans la figure 3.7 (e) où la BRDF miroir entraîne une contribution égale quel que soit le nombre de rebonds effectués par les chemins lumineux. Les inter-réflexions ont un impact visuel plus important à mesure que la rayure devient plus profonde comme le montre la figure 3.17. Dans tous les cas, la prise en compte des inter-réflexions n'entraîne pas de surcout lors du rendu et implique seulement un faible supplément de temps de pré-calcul.

3.2.3 SV-BRDF

La BRDF de rayure peut déjà être utilisée pour représenter un matériau uniforme constitué d'une forte densité de fines rayures parallèles sans espaces entre elles. Comme le montre la figure 3.14, la BRDF permet de reproduire l'effet d'étirement directionnel observé dans la figure 3.1. Toutefois, des variations d'espacement, de largeur, de hauteur et d'orientation des rayures sont nécessaires pour reproduire les effets des lignes scintillantes et des motifs aux bords des reflets.

Une propriété importante du modèle de BRDF de rayure est qu'il est invariant à l'homothétie du profil de la rayure. Autrement dit, si deux rayures de mêmes profils mais de tailles différentes respectent le même ratio d'aspect entre leur hauteur et leur largeur, elles auront la même BRDF. Il est alors possible de parler de profils similaires. Une couche de rayures réunit les rayures parallèles possédant des profils similaires. Par conséquent, une couche peut contenir un ensemble de rayures parallèles mais de tailles différentes tant que le profil et le ratio d'aspect est respecté. La distribution des rayures à la surface peut être définie arbitrairement et nous détaillons notre approche ainsi qu'une implémentation possible dans les sections 3.3.3 et 3.5.4. Pour l'instant, il est suffisant de considérer les rayures d'une couche positionnées grâce à une fonction caractéristique $\mathbf{1}_S : \mathbb{R}^2 \rightarrow \{0, 1\}$. Les rayures de tailles et d'espacements différents vont conduire à des fonctions caractéristiques $\mathbf{1}_S$ différentes. Une telle fonction caractéristique est alors intégrée sur l'aire de l'empreinte d'un pixel ou d'un rayon \mathcal{P} à la surface pour fournir l'*aire relative* de la rayure dans l'empreinte :

$$\alpha(\mathbf{x}) = \int_{\mathcal{P}(\mathbf{x})} \mathbf{1}_S(\mathbf{y}) \, d\mathbf{y}. \quad (3.3)$$

Le modèle de SV-BRDF est alors composé de ρ_s qui sert à décrire les propriétés angulaires du modèle tandis que l'aire relative α caractérise ses variations spatiales à différentes échelles (voir figure 3.3 (c) haut). Ce découplage explicite des variations spatiales et angulaires est le facteur central permettant les performances de notre modèle. Nous faisons ici l'hypothèse implicite que $\mathbf{1}_S$ concorde avec la taille physique des rayures. Autrement dit, la plus petite largeur décrite dans $\mathbf{1}_S$ ne peut pas être inférieure à la largeur de la rayure. De même, l'empreinte \mathcal{P} doit être plus grande qu'une rayure, ce qui définit l'échelle minimum à partir de laquelle le modèle peut fonctionner.

Jusqu'à maintenant, nous avons considéré une seule couche. Pour gérer plusieurs couches, nous calculons une première combinaison linéaire des BRDF de rayure pondérée par les aires relatives $\bar{\rho}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\omega}_{out}, \boldsymbol{\omega}_{in}) = \sum \alpha_k(\mathbf{x}) \rho_{s,k}(\boldsymbol{\omega}_{out}, \boldsymbol{\omega}_{in})$,

l'indice k signifiant la k -ième couche. Cette simple combinaison linéaire ne permet pas de garantir la conservation d'énergie car elle ne prend pas en compte le fait que les rayures peuvent se superposer. Comme les couches de rayures ne sont pas définies en fonction des autres couches, l'aire relative combinée $\bar{\alpha}(\mathbf{x}) = \sum \alpha_k(\mathbf{x})$ peut donc dépasser 1. Pour traiter ce cas de figure, la BRDF accumulée $\bar{\rho}$ est normalisée par la somme des poids $\bar{\alpha}$. Si l'aire est suffisamment grande pour cumuler les rayures sans qu'elles se superposent, $1 - \bar{\alpha}$ représente la quantité de surface sans rayures à laquelle le matériau de base ρ_b peut être assigné. En remettant les éléments ensemble, le modèle de SV-BRDF se résume ainsi :

$$\rho(\mathbf{x}, \boldsymbol{\omega}_{out}, \boldsymbol{\omega}_{in}) = \begin{cases} \bar{\rho} / \bar{\alpha}(\mathbf{x}) & \text{si } \bar{\alpha}(\mathbf{x}) > 1 \\ \bar{\rho} + (1 - \bar{\alpha}(\mathbf{x}))\rho_b & \text{sinon.} \end{cases} \quad (3.4)$$

Tout d'abord, utiliser cette combinaison revient implicitement à contraindre les rayures à se superposer le moins possible. De plus, cette équation ne considère pas le calcul complexe de la BRDF qui pourrait arriver si les rayures s'intersectaient, il est remplacé par une simple moyenne de la réflectance des rayures. C'est sa simplicité qui est la clé pour une évaluation et un échantillonnage préférentiel efficace même dans les scènes complexes, comme expliqué dans la section suivante. Comme le montre la figure 3.3 (d), le modèle est suffisant pour reproduire des lignes scintillantes et des motifs aux bords des reflets convaincants à plusieurs échelles.

3.3 Utilisation du modèle

Le modèle de SV-BRDF de rayure est naturellement adapté à l'échantillonnage préférentiel (section 3.3.1), mais il nécessite une mise au point d'implémentation pour l'évaluation des lumières ponctuelles et directionnelles (section 3.3.2). Dans ces deux sous-sections, nous contraignons notre modèle à sa BRDF, c'est à dire à la radiance réfléchiée par *une seule* rayure. En effet, grâce à la formulation simple de notre modèle de SV-BRDF, la réflexion cumulée est obtenue en combinant linéairement les radiances réfléchies des rayures individuelles selon l'équation 3.4. Même si nos choix des profils de rayures et des distributions sont arbitraires, les ressources sont décrites dans la section 3.3.3, de même que nos différentes implémentations pour les moteurs de rendu temps réel et différé.

3.3.1 Échantillonnage préférentiel

Évaluer l'équation du rendu sur la surface de notre objet rayé revient à faire l'intégral 1D le long du demi-cône de réflexion. Dans cette approche, la

radiance reflétée d'une seule rayure L_r est intégrée numériquement en utilisant l'échantillonnage préférentiel de Monte-Carlo [MU49].

$$L_r(\omega_{out}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\rho_s(\omega_{out}, \omega_{in}) \cos(\phi_{in})}{\text{PDF}_{\phi_{out}}(\phi_{in})} L_i(\omega_{in}), \quad (3.5)$$

avec N le nombre d'échantillons et L_{in} la radiance incidente. Les directions d'échantillonnage ω_{in} sont générées aléatoirement dans le cône de réflexion (i.e., où $\theta_{in} = \theta_{out}$) en suivant la fonction 1D de distribution de probabilité basée sur la BRDF miroir : $\text{PDF}_{\phi_{out}}(\phi_{in}) = \rho_m(\phi_{out}, \phi_{in}) \cos(\phi_{in})$. Pour y parvenir, nous pré-calculons la fonction de distribution cumulée inverse (CDF^{-1}) 1D pour chaque coupe ϕ_{out} de la texture stockant ρ_m . Ce pré-calcul permet de conserver les performances en stockant seulement et de manière compacte la CDF^{-1} dans une texture de la même taille que la BRDF. Moyennant un surcôt mémoire et computationnel considérable, nous aurions pu pré-calculer la CDF^{-1} de la BRDF de rayure complète ρ_s plutôt que de ρ_m . Ce surcôt n'aurait toutefois pas été rentabilisé par la meilleure convergence de l'échantillonnage car les variations dues à l'atténuation de Fresnel n'influent pas sur la position des lobes qui sont déjà bien représentés par la PDF actuelle. Cette approche permettant de prendre en compte les inter-réflexions reste plus précise que les approches basées NDF.

Comme $\rho_m(\phi_{out}, \phi_{in}) \cos(\phi_{in}) = \text{PDF}_{\phi_{out}}(\phi_{in})$, choisir la BRDF miroir permet de grandement simplifier l'équation 3.5 en conservant seulement $L_i(\omega_{in})$ au détriment de la prise en compte du terme de Fresnel :

$$L_r(\omega_{out}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L_i(\omega_{in}), \quad (3.6)$$

Lorsque plusieurs couches de rayures sont utilisées, N échantillons sont employés pour chacune afin de conserver la qualité visuelle. Par conséquent, le temps de rendu augmente linéairement avec le nombre de couches. La section 3.4 présente une optimisation pour la sélection préférentielle dynamique des couches de rayures et son impact sur les performances.

3.3.2 Sources lumineuses

Comme une source de lumière ponctuelle ou directionnelle est infiniment petite, il est impossible qu'elle se trouve exactement *sur le demi cône* de réflexion. Pour pallier ce problème, nous appliquons une fonction d'atténuation autour de la direction de lumière ω_ℓ pour lui donner une épaisseur comme dans l'approche de [YHJ⁺14]. N'importe quelle fonction anisotrope d'atténuation peut faire l'affaire. En pratique, nous utilisons une fonction de type $f_H : \mathbb{R} \rightarrow [0, 1]$

avec un support compact $H \in [0.5, 5]$ comme le montre la figure 3.8. La direction ω'_ℓ correspond à la projection de ω_ℓ sur le demi-cône de réflexion. Elle correspond à $(-\theta_o, \phi_\ell)$ dans le système de coordonnées angulaires du modèle. Nous calculons l'intersection entre le demi-cône de réflexion et le support de f_H (voir figure 3.8) :

$$\phi_\pm = \phi_\ell \pm \sqrt{H^2 - (\theta_\ell - (-\theta_o))^2}.$$

La radiance L_r réfléchiée par une rayure pour une source lumineuse d'intensité L_ℓ est aussi intégrée numériquement :

$$L_r(\omega_{out}) = \frac{(\phi_+ - \phi_-)L_\ell}{\pi N} \sum_{i=1}^N \rho_s(\omega_{out}, \omega_{in}) \cos(\phi_{in}) f_H(\omega_\ell \cdot \omega_{in}), \quad (3.7)$$

avec N le nombre d'échantillons, et ω_{in} une direction dans le segment du cône donnée par $(-\theta_{out}, \phi_{in})$ dans les coordonnées angulaires du modèle, avec ϕ_{in} uniformément distribué dans l'intervalle $[\phi_-, \phi_+]$. Nous aurions pu utiliser un échantillonnage préférentiel de la BRDF dans cet intervalle mais le gain aurait été limité à cause de la petite taille du support d'atténuation utilisé.

Dans un cas de multiples sources lumineuses et/ou de multiples couches de rayures, plusieurs combinaisons de lumières et de directions de rayures ne contribueront pas à la radiance réfléchiée. Notre modèle permet de caractériser simplement ces cas où le demi-cône de réflexion n'intersecte alors pas le support f_H , c'est à dire lorsque $H < |\theta_\ell + \theta_{out}|$. En vérifiant l'inégalité précédente, il devient alors trivial de discriminer les sources lumineuses et/ou les couches de rayures *avant* de perdre inutilement du temps pour calculer la radiance. Cette fonctionnalité correspond à un cas particulier de la méthode de Yan et al. [YHJ⁺14]. Notre modèle est spécifiquement dédié aux matériaux brossés et permet donc d'avoir une solution plus simple et efficace car il est adapté aux propriétés géométriques des rayures.

3.3.3 Détails d'implémentation

Profils de rayure Nous fournissons deux types de contrôles de profil de rayures, comme le montre la figure 3.5 : les fonctions analytiques et les champs de hauteurs tabulés [MDG01]. Dans le deuxième cas, certains profils possèdent des parties qui dépassent de la surface de base, ce qui contredit théoriquement l'hypothèse énonçant des rayures seulement creusées dans la surface. Comme cette hypothèse repose sur la nécessité de confiner les rayons au sein d'une rayure, notre solution consiste à considérer le point le plus haut du profil comme la hauteur de base et à considérer le profil périodique lors du tracé de rayon 2D (voir figure 3.9). En pratique, cette solution est robuste et l'ajout de

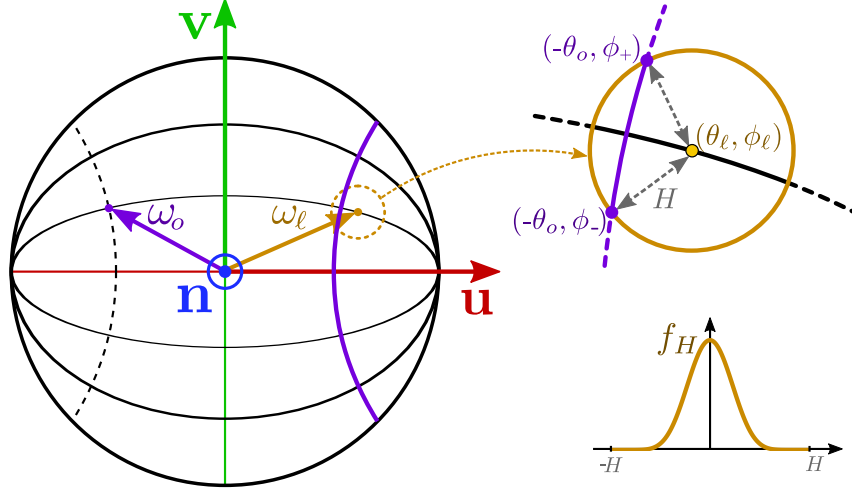


FIGURE 3.8 – Intersection géométrique entre le support de la source de lumière ω_ℓ (en orange) et le demi cône de réflexion (en violet). Le segment intersecté (ligne violette pleine, en haut à droite) est identifié par ses angles de début et fin ϕ_\pm . Nous utilisons $f_H(h) = (1 - (h/H)^2)^2$ comme fonction d'affaiblissement (en bas à droite).

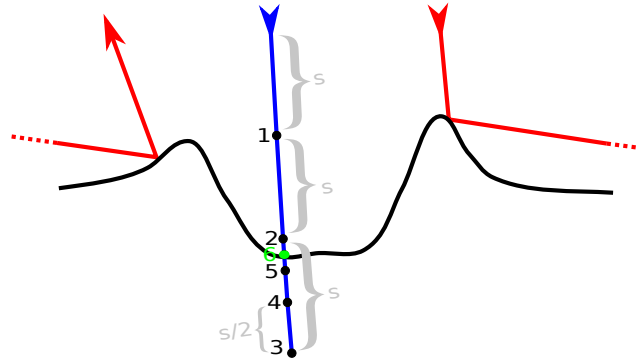


FIGURE 3.9 – En rouge, considérer le profil périodique permet de ne pas perdre les rayons qui ne sont pas encore vraiment sortis de la rayure. En bleu, la recherche dichotomique du point d'intersection se fait dès que le rayon traverse la surface.

profils possédant ce genre de proéminences influe considérablement sur l'apparence aux angles rasants où ils se masquent les uns les autres.

Simulation En fonction de la complexité des profils, nous avons deux solutions pour calculer les intersections entre les rayons et les rayures. Dans le cas des profils analytiques les plus simples, le point d'intersection peut être rapidement calculé analytiquement. Lorsque le profil analytique est trop complexe ou dans le cas des profils tabulés, nous avons utilisé un algorithme procédural dichotomique pour trouver itérativement le point d'intersection de manière efficace (voir figure 3.9). Comme la simulation doit être effectuée sur un grand nombre de rayons, nous avons implémenté la simulation 2D ainsi que l'accumulation de la radiance en CUDA pour conserver l'interactivité lorsque le profil ou les paramètres de Fresnel sont modifiés.

Distribution de rayures Chaque couche de rayures peut posséder sa propre paramétrisation à la surface, qui peut être choisie arbitrairement par l'utilisateur. En pratique, par soucis de simplicité, nous avons lié toutes les couches à un unique champ de tangentes, alignées par défaut à la coordonnée u de l'espace des textures. Les rayures courbées peuvent être obtenues simplement en modifiant la paramétrisation comme le montre la figure 3.18. Une autre solution pour courber les rayures est de définir explicitement le champ de direction avec une texture. La fonction caractéristique $\mathbf{1}_{S_k}$ de chaque couche k est construite à partir d'un bruit binaire étiré le long de \mathbf{u} (voir figure 3.10).

$$\mathbf{1}_{S_k} = \left\lfloor \mathcal{N} \left(R(\Theta_k) \begin{pmatrix} l & 0 \\ 0 & w \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} + \boldsymbol{\xi}_k \right) \right\rfloor_d \quad (3.8)$$

où \mathcal{N} est une fonction 2D de bruit basé cellule et $\lfloor x \rfloor_d$ est une fonction de seuillage égale à 1 si $x \leq d$ et 0 sinon. Le paramètre de densité d détermine la répartition des rayures et du matériau de base sur la surface. Les dimensions des rayures sont contrôlées par la longueur moyenne l le long de \mathbf{u} et la largeur moyenne w le long de \mathbf{v} . Une rotation d'angle Θ_k aléatoirement choisie dans l'intervalle défini par l'utilisateur $[-\frac{\Theta}{2}, \frac{\Theta}{2}]$ est appliquée à chaque couche. Un vecteur de décalage $\boldsymbol{\xi}_k \in [-1, 1]^2$ disperse aléatoirement les couches les unes par rapport aux autres pour éviter les répétitions. La table 3.1 réunit ces paramètres de distribution ainsi que le nombre de couches de tous nos résultats.

Filtrage de la carte d'aire relative Le calcul multi-échelles de la carte d'aire relative α (Équation 3.4) varie selon le type d'implémentation. Dans le cas d'un rendu basé sur une accélération graphique, l'approche la plus simple est de construire les mip-maps de la texture de la fonction $\mathbf{1}_S$ et de laisser le matériel graphique traiter les problème de crénelage lorsque le point de vue est distant. Sans cette possibilité, la méthode dépend des fonctionnalités de

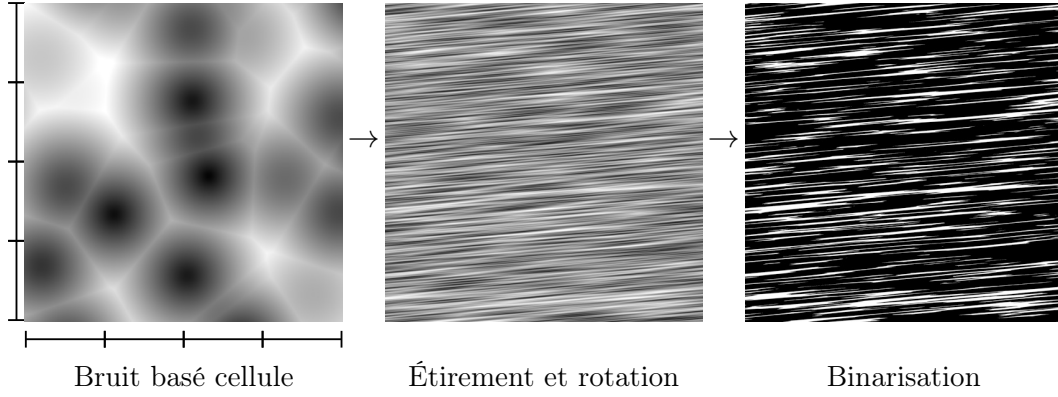


FIGURE 3.10 – Un bruit basé cellule 2D est étiré, pivoté et binarisé pour obtenir la fonction caractéristique d’une couche de rayures. Les paramètres de cet exemple sont : $\Theta = 5$, $l = 0.25$, $w = 2 \cdot 10^{-2}$ et $d = 0.5$.

Image	N	Θ	l	w	d
3.14 (b)	4	7	0.2	$2 \cdot 10^{-4}$	0.6
3.14 (c)	16	360	0.1	$1 \cdot 10^{-5}$	0.3
3.14 (d)	32	360	0.3	$3 \cdot 10^{-4}$	0.05
3.11 (b,d,e)	6	5	0.1	$5 \cdot 10^{-4}$	0.16
3.11 (f)	32	360	0.1	$2 \cdot 10^{-4}$	0.05
3.15 (a)	4	4	0.1	$5 \cdot 10^{-5}$	0.5
3.15 (b)	16	360	0.1	$2 \cdot 10^{-4}$	0.1
3.15 (c)	16	360	0.02	$2 \cdot 10^{-5}$	0.1
3.15 (d)	32	360	0.1	$1 \cdot 10^{-5}$	0.2
3.17 (a)	4	7	0.02	$7 \cdot 10^{-4}$	0.5
3.17 (b)	16	360	0.02	$1 \cdot 10^{-5}$	0.2

TABLE 3.1 – Paramètres de distributions utilisés pour nos résultats.

filtrage appliquées sur la texture des aires relatives, ce qui reste transparent pour l'utilisateur.

3.4 Résultats

3.4.1 Édition interactive des matériaux

Le modèle de SV-BRDF a été implémenté dans un moteur de rendu progressif OpenGL personnalisé. Bien qu'il ne prenne en compte que l'éclairage direct, il permet d'obtenir un retour visuel suffisamment riche pour la conception de matériaux. L'utilisateur peut modifier le profil des rayures, les paramètres de Fresnel, la distribution des rayures, le point de vue et l'éclairage interactivement comme le montre la figure 3.11

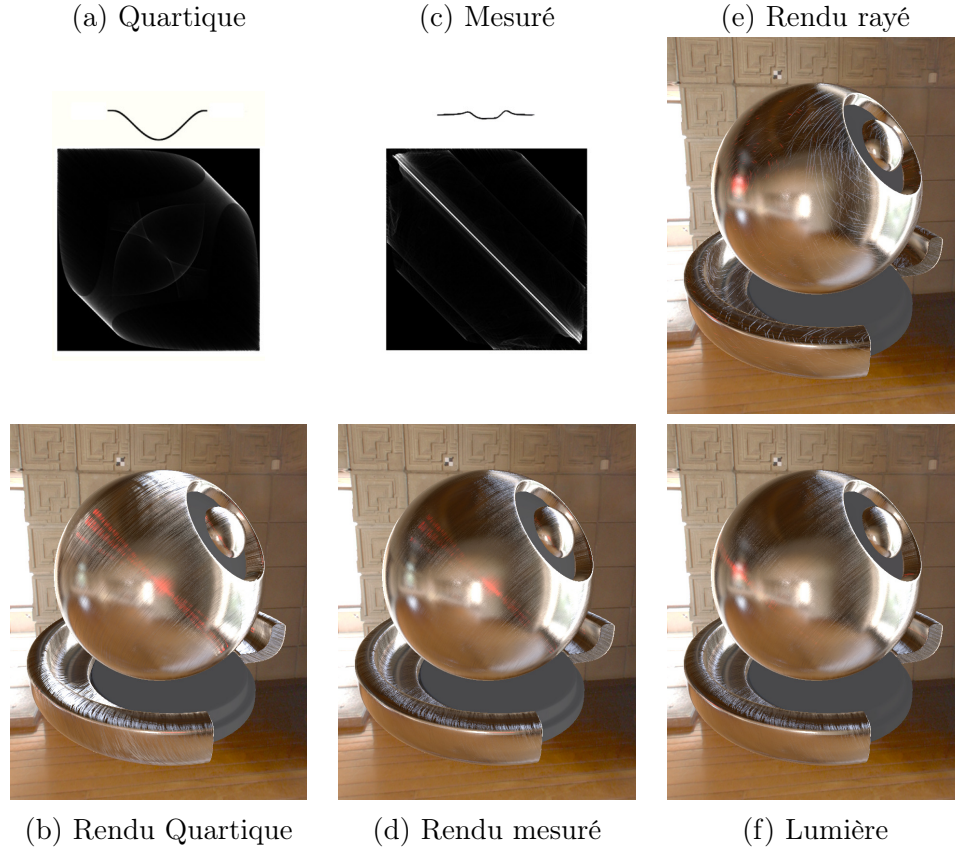


FIGURE 3.11 – Captures d’écran d’une session d’édition interactive des matériaux, à la résolution 615×780 , en utilisant 64 échantillons par pixel et par couche de rayures. Afin d’avoir un retour rapide, nous effectuons un rendu progressif en éclairage direct, sans les ombres. La session commence (a) avec la BRDF d’un profil de rayure quartique appliqué en (b) un motif brossé (utilisant 6 couches) sur l’objet test éclairé par une carte d’environnement et une source de lumière ponctuelle rouge. Lorsque (c) un profil mesuré [MDG01] est utilisé, la BRDF est recalculée en 100ms. L’apparence du matériau s’en trouve changée en (d) : les rayures sont moins prononcées et les reflets sont moins allongés. En (f) la direction de la lumière rouge est modifiée, cela aide à sonder interactivement (749 ms) la réponse du matériau pour différentes orientations de lumière. (e) Le motif de rayure est alors changé (utilisant 32 couches), les autres paramètres du matériau ne changent pas. Malgré l’augmentation du nombre de couches, le rendu prend seulement 776ms au total grâce à la discrimination précoce des couches (voir texte).

Nb layers	1	6	16	32
Brushed	166	749	1850	3540
Scratched	93	185	419	776

TABLE 3.2 – Les performances (en ms) pour rendre une image en 615×780 avec 64 échantillons par pixel et par couche afin d’obtenir une bonne qualité visuelle. La discrimination des couches basées sur α est utilisée comme elle est expliquée dans le texte. Les temps sont calculés pour des matériaux brossés et rayés en variant le nombre de couches. Les valeurs encadrées correspondent aux résultats de la figure 3.11 a, d et e (pour la valeur brossée) et la figure 3.11 f (pour la valeur rayée).

En pratique, le calcul de la BRDF repose sur une méthode de lancer de rayon accélérée en utilisant CUDA pour fournir des mises à jour rapides de la BRDF de rayure (ainsi que la PDF et la CDF inverse) lorsque le profil est modifié. Ce pré-calcul prend entre 100ms et 300ms pour remplir une image de BRDF à la résolution 256×256 , en envoyant $N = 10000$ échantillons par colonne (discretisation de ϕ_o). Le moteur de rendu progressif fonctionne en GLSL par l’accumulation des résultats de plusieurs passes de rendu. Il fonctionne avec les sources de lumière et les cartes d’environnement. En utilisant une approche naïve, le temps de calcul augmente linéairement avec le nombre de couches de rayures. Pour réduire le calcul sans perte de qualité perceptible, une discrimination de couches a été ajoutée : la k -ième couche ne sera pas évaluée si $\alpha_k < 10^{-6}$. La complexité est donc meilleure (sous linéaire) grâce à cette optimisation, comme le résume la table 3.2. En pratique, les motifs brossés ne nécessitent habituellement pas plus de 6 couches. Afin d’avoir un retour visuel rapide, les échantillons sont répartis sur les différents rafraîchissements du rendu progressif. En comparaison de la méthode de Yan et al. [YHJ⁺14] qui nécessite une importante structure de données, notre solution est beaucoup plus rapide car elle nécessite seulement quelques valeurs de textures et de simples fonctions analytiques. De plus, le filtrage de la texture des *alpha* est linéaire et peut donc être effectué efficacement par le *mipmapping*.

Nous avons également testé une méthode d’échantillonnage préférentiel des couches de rayures. Le nombre *total* d’échantillons est réparti en fonction des α_k . La figure 3.12 montre que seulement 128 échantillons par pixel (répartis sur les 32 couches) peuvent ainsi produire un bon résultat par rapport à une répartition uniforme. Une amélioration possible serait de pouvoir effectuer l’échantillonnage par rapport à une estimation de la réponse lumineuse que produirait la rayure concernée, ce qui nécessiterait néanmoins une connaissance a priori de l’environnement lumineux.

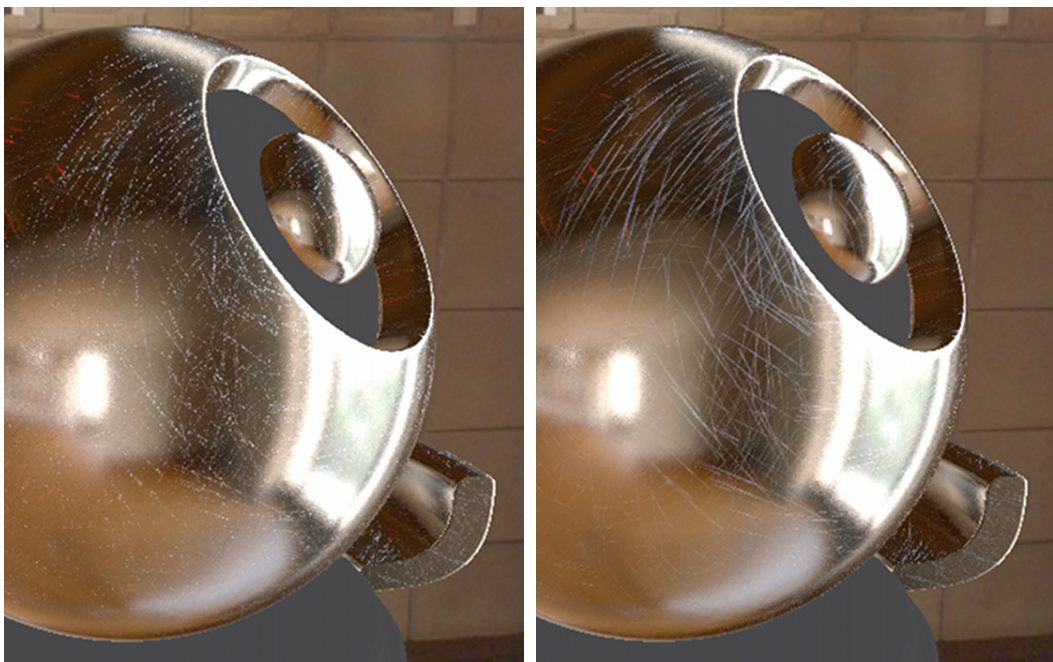


FIGURE 3.12 – Calculer l'image avec seulement 128 échantillons par pixel (répartis sur les 32 couches) produit des rayures bruitées. Lorsque nous ajoutons l'échantillonnage préférentiel des couches, le *même* nombre d'échantillons (droite) permet de mieux décrire les rayures.

La BRDF de rayure, la CDF inverse et la PDF sont des textures de 256×256 qui nécessitent respectivement trois, deux et un canal. La taille totale nécessaire est donc de 1.5 Mo sans compression. L'aire relative $\alpha(x)$ est stockée dans une texture mais elle pourrait aussi être calculée de façon procédurale par choix artistique ou si l'utilisation mémoire devenait critique. Cependant, pour que le matériau conserve ses propriétés multi-échelles, le bruit procédural doit pouvoir être évalué à des échelles différentes de façon efficace. De manière générale, la carte d'aire relative peut avoir une définition beaucoup plus faible qu'une carte de normales pour la même précision. Plus spécifiquement, si la largeur de la plus large rayure d'une carte de normales haute résolution est de w texels, alors une carte d'aire relative de résolution w fois plus faible dans chaque dimension sera suffisante. En pratique, sur une carte de normales il faut au moins $w = 10$ texels pour caractériser un profil de rayure, par conséquent la carte d'aire relative sera au moins 100 plus petite que la carte de normale pour la même qualité.

3.4.2 Résultats avec éclairage global

Nous avons mis en valeur notre modèle de SV-BRDF dans le moteur de rendu Cycle, intégré à Blender. En plus de permettre de démontrer la viabilité du modèle dans des scènes avec éclairage global, nous avons pu utiliser un système de création et de contrôle des distributions de rayures alternatif grâce au système nodal de Blender. Les figures 3.14, 3.15 et 3.17 incluent des vues de près qu'il ne faut pas confondre avec des zooms ou des grossissements d'images.

La figure 3.14 (a) montre la BRDF de rayure uniformément appliquée, ce qui correspond à des rayures parallèles densément regroupées. Même dans ce cas simple, le modèle de BRDF reproduit certains effets d'un métal brossé tel que l'étirement des réflexions observées dans la figure 3.1 (a). L'intensité de la courbe spéculaire varie à cause de la division du lobe spéculaire (*split off-specular peaks*) [PK03]). La figure 3.14 (b) utilise quant à elle le modèle de SV-BRDF avec une distribution de rayures réparties sur 4 couches orientées autour d'une direction principale. Cela permet de reproduire les éléments de l'apparence d'un métal brossé, comme dans la figure 3.1 (b), avec des motifs aux bords des reflets et un reflet proche du miroir provenant du matériau de base, visible entre les rayures. Les figures 3.14 (c-d) utilisent des distributions où les rayures couvrent toutes les orientations. La différence se fait sur la densité des rayures (avec respectivement 16 et 32 couches) et sur la profondeur du profil utilisé (profond en (c) et quasiment plat en (d)). La figure reproduit l'effet vu dans la figure 3.1 (c), où des lignes scintillantes apparaissent distinctement, surtout autour des reflets forts du matériau de base. Les vues proches révèlent le comportement complexe de notre modèle à travers les différentes échelles. Les rayures ne sont pas seulement mieux visibles mais de nouveaux motifs de

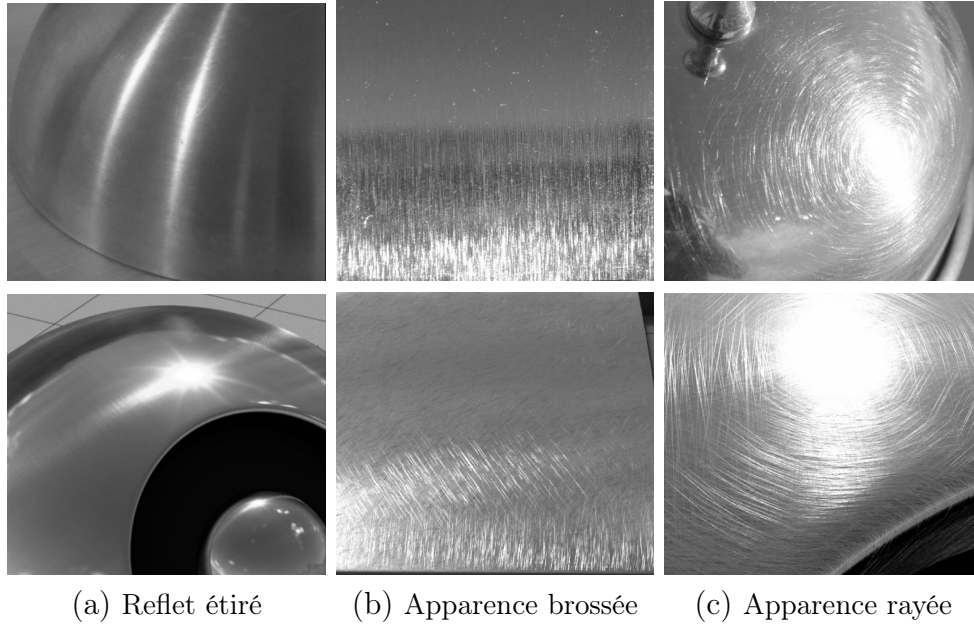


FIGURE 3.13 – La comparaison de notre modèle de matériau avec des photos montre sa capacité à reproduire les différents effets que nous avons présentés au début du chapitre 3 : (a) l’étirement du reflet anisotrope, (b) les motifs qui apparaissent à la silhouette du reflet d’un métal brossé et (c) les cercles de reflets produits par les lignes scintillantes des matériaux rayés. La ligne du haut montre les photographies tandis que la ligne du bas montre nos résultats.

réflexions peuvent apparaître.

Nous avons comparé avec des photographies les effets que nous voulions obtenir grâce à notre modèle de matériaux. La figure 3.13 montre le résultat de nos comparaisons. Les résultats sont en noir et blanc afin de pouvoir comparer les luminances et enlever l’influence des couleurs sur le résultat. Nous avons réussi à reproduire l’étirement du reflet que nous avons observé avec les matériaux brossés lorsque le point de vue est suffisamment distant pour que les variations spatiales ne se distinguent plus (voir figure 3.13(a)). La figure 3.13(b) montre que notre modèle peut reproduire les motifs aux silhouettes des reflets des matériaux brossés. Cette apparence est obtenue en utilisant plusieurs couches de rayures. La figure 3.13(c) révèle qu’avec de nombreuses couches de rayures, notre modèle est capable de reproduire l’effet des lignes scintillantes et l’illusion des cercles de lumières présents autour du reflet classique.

Le modèle de SV-BRDF est adapté pour modéliser une importante gamme de matériaux brossés ou rayés. La figure 3.15 (a) reproduit l’apparence de l’or finement rayé, où les rayures sont tellement étroites qu’elles sont presque

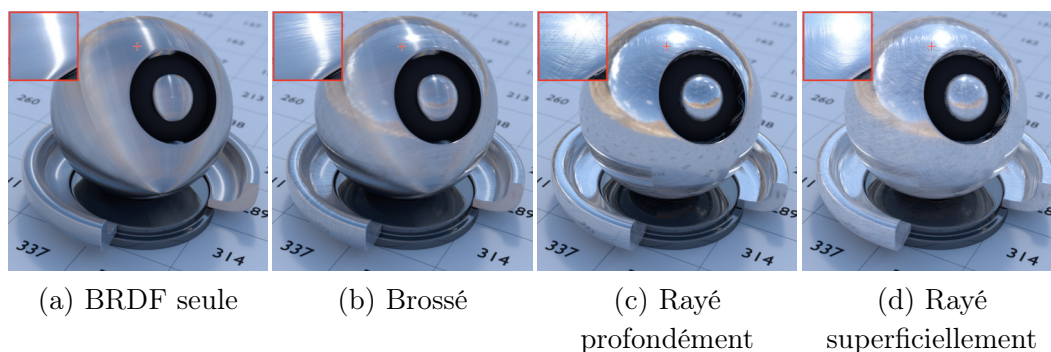


FIGURE 3.14 – (a) La BRDF seule est appliquée sur tout l’objet et provoque un étirement des reflets. (b) Une distribution dense de rayures orientées dans la même direction principale provoque des motifs aux bords des reflets. (c-d) Une distribution de rayures espacées et orientées dans toutes les directions provoque des lignes scintillantes et des cercles commencent à se former autour des reflets les plus forts.

indiscernables. Ici, les couches de rayures sont orientées autour d’une direction principale sur la surface, ce qui produit un reflet allongé mélangé à la réflexion miroir de l’or. La figure 3.15 (b) utilise deux BRDF différentes pour les rayures et la base pour imiter l’apparence de la peinture métallisée rayée. Une faible densité de rayures orientées dans toutes les directions permet de reproduire la détérioration aléatoire attendue avec ce genre de matériau. La figure 3.15 (c) utilise une distribution plus dense de rayures dans toutes les directions, et ajoute un terme diffus commun pour la base et la BRDF de rayure. Avec un choix d’indice de réflexion approprié ($n = 1.5$), cela permet de reproduire l’apparence d’un plastique rayé. La figure 3.15 (d) utilise une configuration similaire pour imiter l’apparence du bois vernis, la couleur diffuse est calculée à partir d’une texture de bois. Ici encore, les gros plans révèlent le comportement du modèle de SV-BRDF où des réflexions peuvent émerger.

Les performances du modèle de BRDF (équation 3.2) de rayures sur Cycles sont comparées avec le modèle anisotrope GGX [WMLT07] dans le cas où l’objet est recouvert d’une seule couche de rayures qui recouvre tout l’objet (comme dans la figure 3.15 (a)). La figure 3.16 montre les résultats avec 1000 échantillons par pixel avec chacun des deux modèles. A cause de la prise en charge des inter-réflexions, notre solution apparaît plus lumineuse. Le modèle GGX prend 484 secondes tandis que le modèle de BRDF de rayure est un peu plus lent avec 550 secondes même s’il est important de souligner que notre implémentation n’est pas optimisée.

La figure 3.17 permet de montrer l’impact significatif du choix du profil sur l’apparence du matériau. Les profils presque plats (colonne gauche) produisent

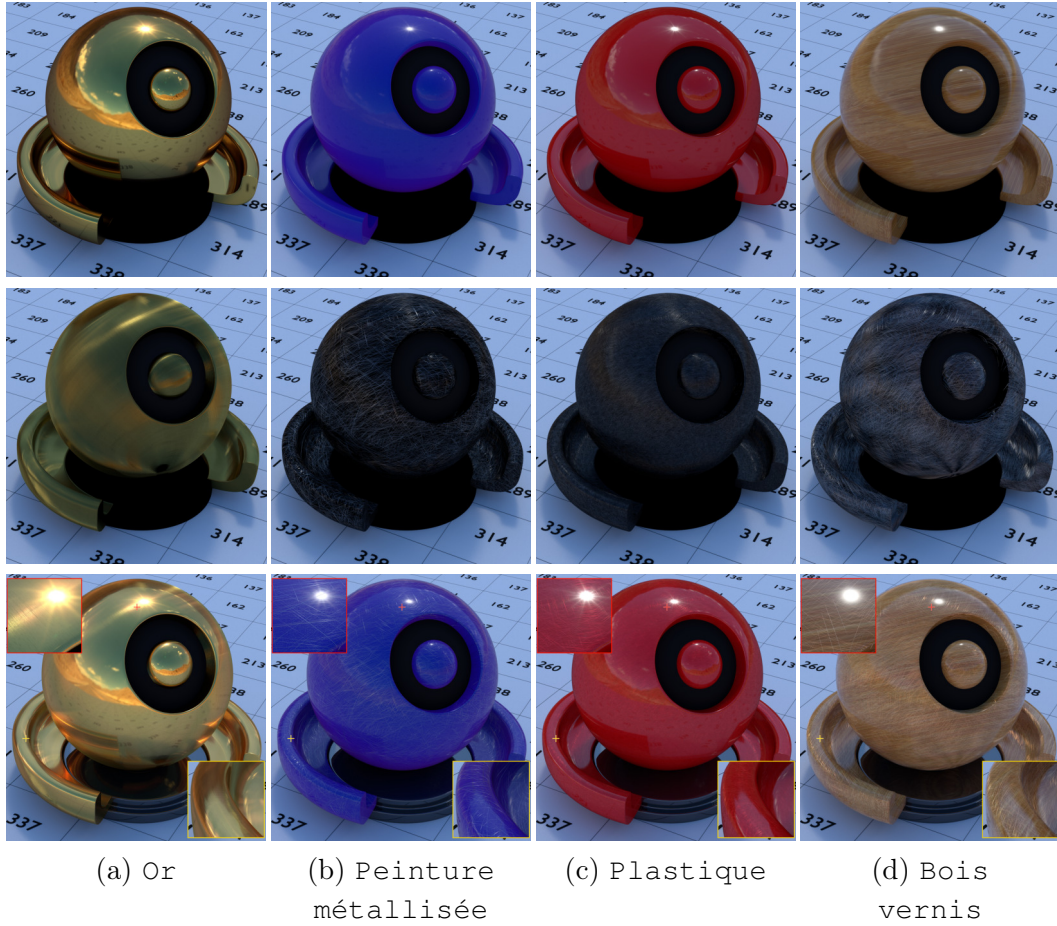


FIGURE 3.15 – Quatre matériaux sont rendus avec de l'éclairage global, avec différents paramètres de profil, de Fresnel et de distribution. (a) L'Or (4 couches) est obtenu par une distribution régulière de petites rayures considérablement espacées, combinées avec une base très spéculaire. (b) La Peinture métallisée (16 couches) utilise une distribution dispersée de rayures avec de multiples orientations et une BRDF de peinture en guise de matériau de base. (c) Le Plastique (32 couches) utilise la formule de Fresnel pour les diélectriques et ajoute un terme diffus uniforme à une distribution dense de rayures. (d) Le Bois vernis (16 couches) est similaire au Plastique, sauf que la distribution est encore plus dispersée et qu'une texture est utilisée pour le terme diffus. Les deux premières lignes montrent les effets séparés des rayures et du matériau de base tandis que la dernière ligne montre l'apparence produite par la combinaison des deux.

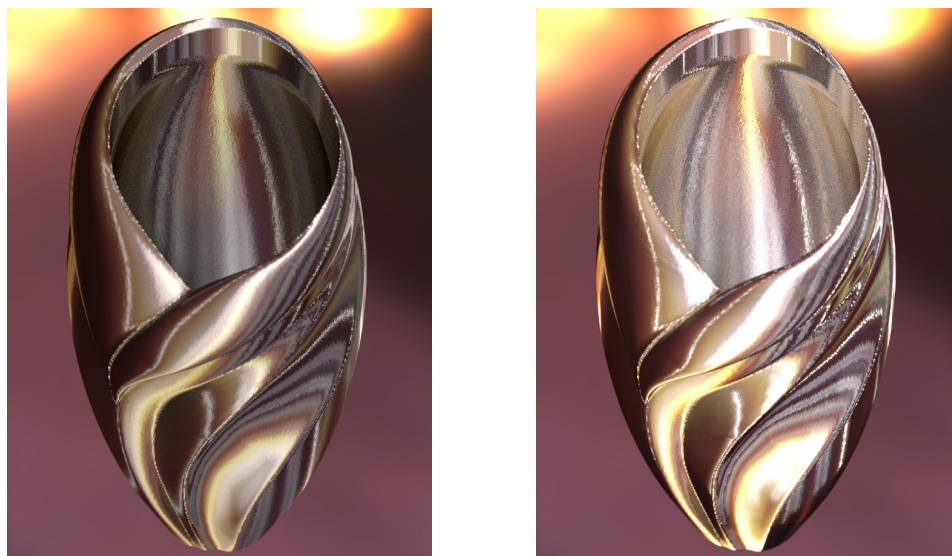


FIGURE 3.16 – Résultats en éclairage global utilisé pour la comparaison de performances. Gauche : La BRDF GGX de Cycles. Droite : Notre modèle de BRDF de rayure.

de multiples réflexions à cause des différents lobes spéculaires, tandis que les profils plus abrupts provoquent une apparence différente. Comme le nombre d'inter-réflexions augmente, les rebonds supplémentaires sont atténués par l'effet Fresnel et des rayures plus sombres apparaissent. Visuellement, les lignes scintillantes sont plus contrastées (voir les vues proches). Finalement, il est possible de faire courber les rayures en modifiant la paramétrisation de la surface de chaque couche, et ainsi augmenter les variations possibles sans augmenter le nombre de couches.

3.5 Discussions

3.5.1 Intersections de rayures

Les performances du modèle reposent sur l'hypothèse que la rayure est un profil 1D extrudé dans la direction \mathbf{u} . Les directions de sorties d'un rayon après être rentré dans la rayure se trouvent alors toutes sur le cône de réflexion. En ajoutant les variations spatiales, le système de couches de rayures parallèles permet de conserver l'hypothèse et les performances. Pour augmenter les possibilités du modèle de motif, il est possible d'utiliser plusieurs couches avec des orientations différentes. A partir de ce point, le modèle fait alors une approximation. Si en un point donné, deux couches différentes possèdent des rayures, alors les deux coexistent. Géométriquement, il existe alors une zone où les rayures s'intersectent, et le modèle ne prend pas en compte la variation

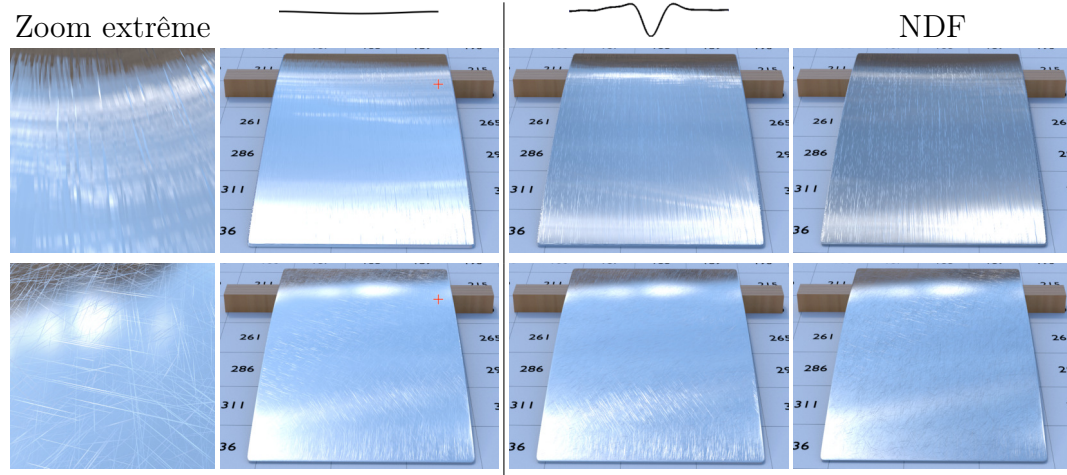


FIGURE 3.17 – Le choix du profil de rayure a un impact fort sur l'apparence du matériau, qu'il soit brossé (ligne supérieure) ou rayé dans toutes les directions (ligne inférieure). La colonne de gauche montre la limite de notre méthode pour des vues excessivement proches où une rayure peut occuper plusieurs pixels. La troisième colonne utilise un profil de rayure plus profond qui conduit à des réflexions plus contrastées à cause des multiples rebonds qui sont atténués par l'effet Fresnel. Nous comparons nos résultat avec un modèle basé NDF dans la dernière colonne pour montrer l'importance des inter-réflexions. Le matériau apparaît plus faible avec la NDF à cause des nombreuses rayures qui ne renvoient pas la lumière des différentes inter-réflexions.

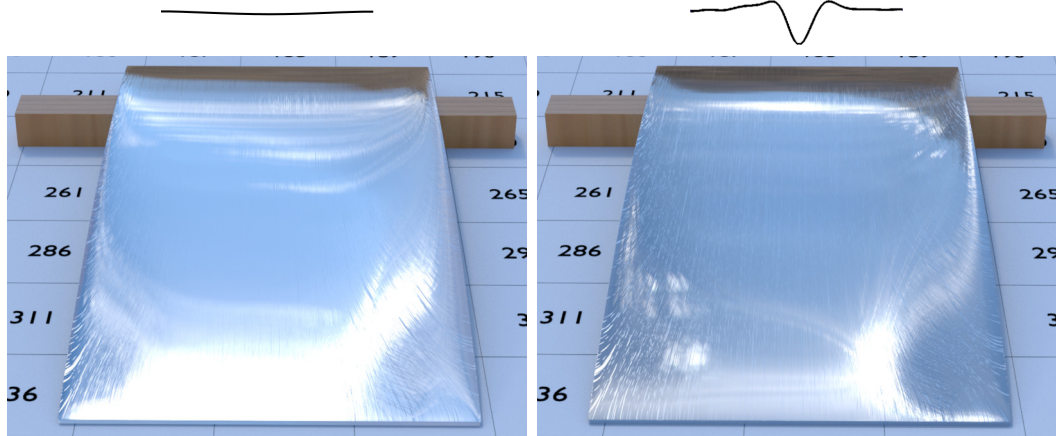


FIGURE 3.18 – Les rayures courbées peuvent être obtenues en modifiant la paramétrisation sous-jacente. Ici, nous avons utilisé les mêmes profils et les mêmes distributions que les deux résultats centraux de la ligne supérieure de la figure 3.17

d'apparence que cause cette intersection.

Il serait alors intéressant de mesurer l'impact de l'approximation sur l'apparence finale. Pour les mesurer, il faudrait alors connaître la géométrie finale des zones d'intersections. L'aire occupée par ces événements varie en fonction de la configuration des motifs. Lorsque les rayures sont très éloignées et d'orientations très différentes (matériau rayé), les intersections occupent alors moins de surface que dans le cas d'une surface brossée.

Les intersections impliquent qu'un rayon entrant dans une rayure peut alors, en passant par l'intersection, ressortir par une seconde rayure. Cette propriété entre en contradiction avec l'hypothèse faite selon laquelle une rayure est l'extrusion linéaire d'un profil 1D. A l'échelle de la BRDF, cela signifie que les rayons sortants ne sont plus compris dans le même cône de réflexion. Le modèle de BRDF ne peut alors plus forcément profiter de la réduction de dimension et des optimisations numériques qu'elle implique. Toutefois, si le problème concerne toujours l'intersection de deux rayures, il pourrait être envisageable de quantifier le transfert d'énergie que les rayures pourraient effectuer ainsi que les nouveaux cônes de rayons transférés. Une approximation consisterait à isoler les intersections, évaluer statistiquement leur impact et introduire le résultat dans le modèle.

3.5.2 Vue proche

Largeur d'une rayure Notre modèle de SV-BRDF s'appuie sur l'hypothèse selon laquelle les rayures sont moins larges que l'empreinte des pixels dans lesquels elles sont évaluées. La BRDF infinitésimale utilisée ne prend donc pas en compte la largeur des rayures. Les cartes d'aires relatives simulent les variations spatiales produites par les matériaux non homogènes mais elles ne garantissent pas qu'un motif de rayure comprenne une seule rayure relativement large ou une zone brossée possédant une multitude de fines rayures. Dans cette section, nous considérons que la largeur des rayures est définie et connue.

Cas d'échec La méthode de mélange des BRDF de rayure de la section 3.2.3 montre ses limites pour les points de vue trop proches. La colonne de gauche de la figure 3.17 montre que dans ces cas, les rayures deviennent considérablement plus larges que la taille d'un pixel et utiliser la BRDF ne permet pas de voir les variations spatiales à l'intérieur de la rayure. Cette limitation est similaire à celle de Irawan et al. [IM12] dont les motifs des fibres apparaissent simplifiés lors des vues proches.

Pour que l'apparence reste correcte pour une échelle encore plus proche, le comportement de la lumière dans les rayures doit prendre en compte les variations spatiales. Les informations de profil, de largeur des rayures et des cartes d'aires relatives, sont suffisantes pour recréer procéduralement la surface. Il est alors possible d'utiliser le lancer de rayon pour simuler correctement le comportement (voir figure 3.19). Une transition douce entre le modèle de SV-BRDF et le lancer de rayon peut se faire à partir du moment où l'empreinte du pixel à la surface de l'objet est plus petite que la largeur d'une rayure.

Si toutes les hypothèses faites sur la rayure pour le modèle de SV-BRDF restent valides pour la simulation, alors il est possible d'exploiter la réduction de dimension pour les intersections avec le profil. Toutefois, malgré les optimisations possibles, l'échantillonnage du lancer de rayon sera toujours un frein aux performances.

Dans notre modèle de SV-BRDF, lorsque plusieurs couches de rayures se superposent, les intersections entre les rayures de couches différentes ne sont pas considérées. Cette approximation est raisonnable parce que c'est la moyenne des réflectances qui est effectuée. Lorsque la géométrie doit être générée, il devient plus difficile de gérer les intersections entre rayures. Si le système de génération procédurale permettait de générer géométriquement ces cas, l'hypothèse de la rayure qui ne varie pas le long de son axe ne serait plus vraie. Il faudrait alors effectuer la simulation sans les optimisations que présentait le cas particulier des rayures. De plus, la zone de transition entre les deux méthodes

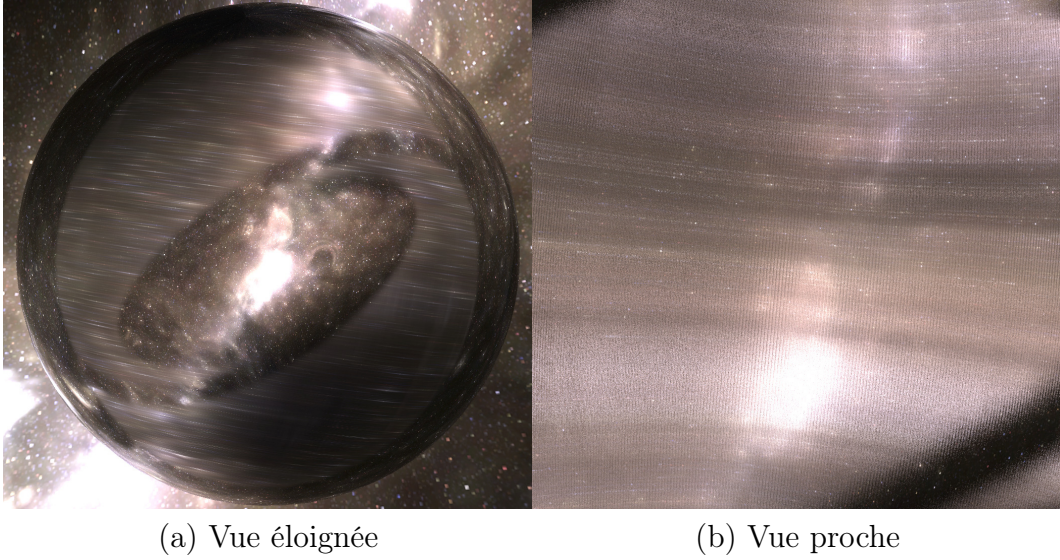


FIGURE 3.19 – (a) Notre modèle est utilisé pour calculer l’apparence de la vue éloignée. Lorsque la vue est trop proche et que l’intérieur des rayures peut être distingué, (b) le lancer de rayon peut être utilisé sous certaines conditions de motifs.

de rendu pourrait se voir puisqu’elles ne représenteraient plus exactement la même apparence.

L’approche de génération de la géométrie optimisée ne peut alors être utilisée que dans le cas d’une seule couche de rayures ou d’un cas où il n’y a pas d’intersection. La référence de la figure 3.7 a été calculée en utilisant cette technique. La largeur des rayures a été choisie pour être beaucoup plus petite que la taille du pixel afin de représenter au mieux la véritable apparence de l’objet.

Création d’une *apparent-BRDF*

La BRDF de la rayure peut être calculée rapidement grâce à un algorithme de tracé de rayons exploitant la faible dimensionnalité de la rayure et la parallélisation. Les rayons sortants de la rayure sont alors accumulés dans la grille de la BRDF suivant leur direction. Mais les rayons pourraient également être différenciés suivant leur position. Le résultat pourrait alors être stocké dans une grille 3D $M \times M \times M$ de paramètres ϕ_o , ϕ_i et p_i avec p_i la position sur le profil. Comme elles ne respectent plus le principe de réciprocité (voir figure 3.20 (a)), chaque sous-grille 2D de paramètres ϕ_o et ϕ_i devient alors une *apparent-BRDF* (A-BRDF) [WHON97].

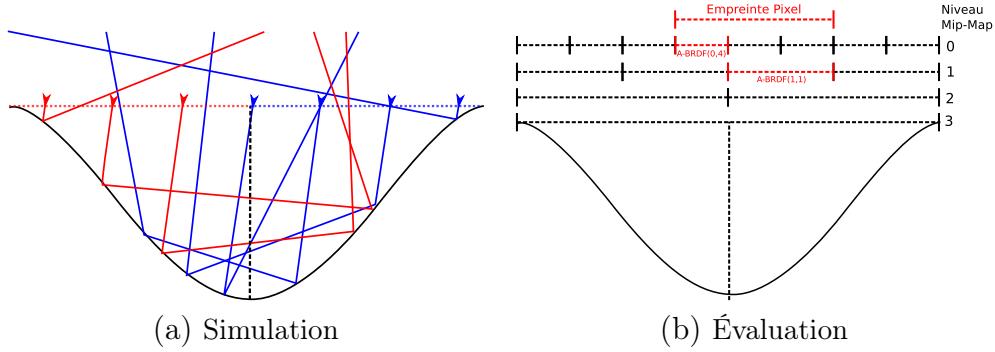


FIGURE 3.20 – (a) Les rayons peuvent entrer et sortir dans des portions du profil différentes, les A-BRDF ne sont donc pas réciproques. (b) Trouver l'A-BRDF d'un pixel revient à faire la somme des A-BRDF des sous-portions du profil.

Chaque A-BRDF représente alors une sous-partie d'une BTF. La discrétisation spatiale du profil en M portions permettrait alors de représenter une version plus fine de l'apparence. Lors de l'évaluation, la position du pixel sur la rayure permettrait de trouver la A-BRDF correspondante qui pourrait être utilisée de la même manière que la BRDF de rayure.

Théoriquement plus efficace que l'approche d'échantillonnage sur la géométrie générée procéduralement, la création des A-BRDF entraînerait toutefois un surcout de calcul lors de la simulation initiale pour connaître et séparer les positions. De plus, la division spatiale entraîne l'augmentation du modèle d'une dimension qui se répercutera sur l'utilisation mémoire de la méthode. Lorsque l'empreinte du pixel est plus petite que la largeur de la rayure mais encore beaucoup plus grande que $\frac{1}{M} \times$ la largeur de la rayure, chacune des A-BRDF inscrites dans son empreinte devra être évaluée.

Il est envisageable de pré-filtrer cette grille 3D en utilisant le principe des *mip-maps*. En effet, l'A-BRDF d'une portion de taille $\frac{2}{M} \times$ la largeur de la rayure serait égale à la moyenne de ses 2 sous-A-BRDF. Chaque niveau de mip-maps permettrait alors d'avoir une résolution spatiale deux fois plus grossière. Le niveau le plus haut de mip-map correspond ainsi à la BRDF.

Lors de l'évaluation, pour une couche donnée, il faudrait alors réussir à isoler les A-BRDF nécessaires à évaluer. La moyenne de ces A-BRDF permettrait d'obtenir l'A-BRDF du pixel (voir figure 3.20 (b)). L'évaluation de cette A-BRDF pourrait toutefois être sensiblement différente de celle de la BRDF de rayure. En effet, dans cette approche, nous sommes capables de connaître la position de sortie d'un rayon mais pas sa position d'entrée. Or, il faudrait être

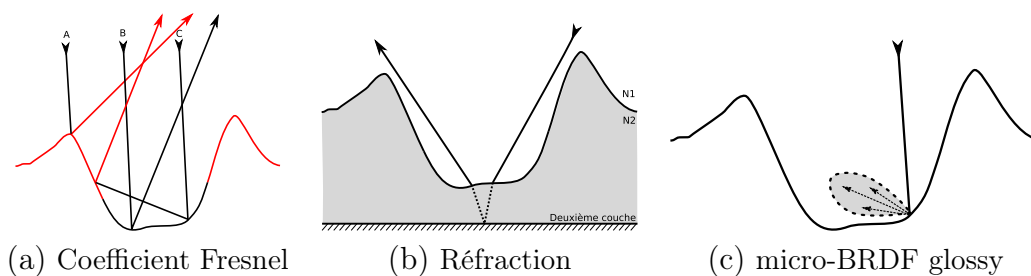


FIGURE 3.21 – (a) La variation du coefficient de Fresnel suivant la position dans le profil et la longueur d’onde permettrait de simuler une rayure faite sur une surface métallique (bas de la rayure) peinte en rouge (haut de la rayure). Le rayon A rebondit contre la partie peinte en rouge tandis que le rayon B touche la partie métallique. Le rayon C quant à lui touche les deux parties de la rayure. (b) La gestion de la réfraction durant la simulation permettrait de simuler les surfaces vernies. (c) Utiliser une micro-BRDF plus complexe entrainerait la nécessité d’échantillonner plusieurs directions à chaque intersection de la simulation.

capable de normaliser les A-BRDF pour les utiliser. Lors de l’évaluation, ce terme de normalisation devrait être ajouté.

3.5.3 Modification de la micro-BRDF

Pour simplifier la simulation du transport lumineux dans la rayure, la micro-BRDF utilisée correspond à un réflecteur de Fresnel dont le coefficient est constant sur tout le profil. Modifier cette micro-BRDF permet d’avoir degrés de liberté supplémentaires.

Coefficient de Fresnel Dans notre modèle actuel, le coefficient de Fresnel est constant sur le profil et sur les longueurs d’onde. L’application d’un coefficient différent pour différentes longueurs d’onde permet de simuler la coloration du matériau de la rayure (voir figure 3.21 (a)). Il faut alors stocker une BRDF par longueur d’onde ou, plus classiquement dans notre domaine, faire une approximation en utilisant le modèle colorimétrique RGB qui serait donc composé de trois BRDF différentes. Dans la mesure où l’équation de Fresnel produit une réflexion complète à angle rasant, l’un des canaux de la BRDF est commun aux différentes longueurs d’onde.

Nous pourrions également faire varier la valeur du coefficient le long du profil. Associé à la coloration de la surface, il deviendrait possible de mieux représenter la rayure. Par exemple, la rayure sur un objet peint pourrait avoir deux couches : en surface, la peinture elle-même, et au fond de la rayure son matériau-support (voir figure 3.21 (a)).

Réfraction Il serait intéressant de pouvoir mieux représenter les matériaux recouverts d'une couche de vernis comme le bois vernis de la figure 3.15 (d). Incorporer des propriétés multi-couches dans un modèle basé simulation sur les primitives revient à traiter la réfraction lors de la simulation (voir figure 3.21 (b)). La couche sous le vernis devrait alors respecter les mêmes conditions de micro-BRDF que le reste de la rayure, c'est à dire produire des réflexions miroir.

Micro-BRDF généralisée L'extension la plus générale du modèle consisterait à utiliser un modèle de micro-BRDF plus complexe dans la rayure. La simulation deviendrait beaucoup plus longue à cause des échantillonnages nécessaires à chaque inter-réflexion (voir figure 3.21 (c)). De plus, la possibilité de rebondir en dehors de la direction miroir annulerait les possibilités de réaliser la simulation dans seulement deux dimensions. Enfin, les rayons sortants ne seraient plus contraints dans le cône de réflexion et le modèle de BRDF perdrait la réduction de dimension et ses avantages. Bien que la gestion d'une micro-BRDF plus complexe rende difficilement possible la conservation des performances de l'approche, elle permettrait de comparer les résultats et les limitations de notre méthode.

3.5.4 Création des motifs de la SV-BRDF

Le système de couches que nous avons employé pour créer les motifs des rayures permet d'utiliser des textures pour définir les cartes d'aires relatives. Pour nos résultats, nous avons créé ces motifs en utilisant un bruit paramétré pour approcher l'apparence des rayures. Ces bruits sont difficiles à manipuler et permettent seulement un contrôle global de l'apparence de la surface. Une piste pour les travaux futurs serait d'améliorer les méthodes de création de ces motifs. Cette section présente les différentes idées que nous avons pour créer de meilleurs motifs suivant les contextes.

Contrôle de paramètre plus proche du contenu sur la surface Nous avons utilisé les paramètres décrits dans la section 3.3.3 pour contrôler la création des motifs. Plusieurs améliorations pourraient être apportées à leur paramétrisation. La première amélioration importante serait de pouvoir contrôler la densité totale plutôt qu'une densité par couche. Nous avons créé nos couches avec des densités de rayures uniformes sur la surface alors que certains objets sont plus ou moins rayés suivant les endroits. Enfin, nos paramètres sont trop liés au fait que nous utilisons un bruit pour générer les motifs tandis qu'ils devraient être en rapport seulement avec la configuration des rayures sur la surface.

Une autre approche serait de générer les motifs en utilisant une métaphore réaliste de brossage ou d'usure de la surface. Le logiciel Substance Painter [All]

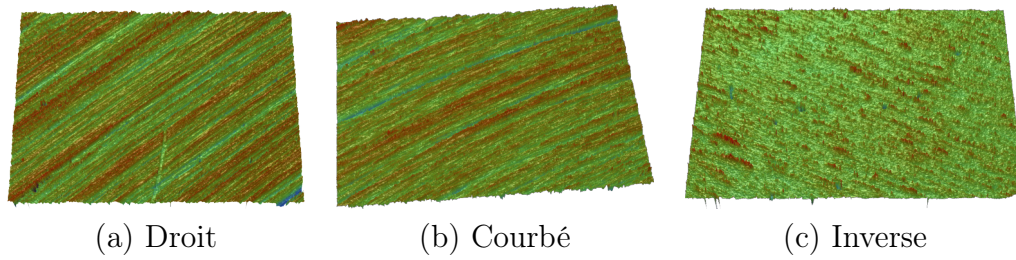


FIGURE 3.22 – (a) Si le champ de hauteur représente une surface constituée de rayures bien droites et parallèles, notre modèle pourra bien la représenter. (b) Lorsque les rayures sont courbées, il faudra choisir judicieusement la paramétrisation pour courber les couches. (c) Dans certains cas, les rayures sont trop nombreuses pour être efficacement séparées et notre modèle sera difficile à adapter.

est basé sur un concept similaire et produit des résultats visuellement très riches.

Données mesurées Un autre moyen de créer les motifs en minimisant le travail de l'utilisateur serait de partir de données mesurées. La géométrie de la surface peut être mesurée à l'aide d'un profilomètre. Il est possible de mesurer seulement le profil d'une rayure à la manière des travaux de Mérillou [MDG01] ou de capturer le champ de hauteur complet correspondant à la surface comme dans les travaux de Dong [DWMG15]. Bien que ce champ de hauteur contienne toutes les informations nécessaires pour recréer les motifs (voir figure 3.22), le représenter avec notre modèle basé sur les couches de rayures reste difficile. La première difficulté consiste à trouver le bon nombre et les bonnes orientations des couches qui devront être utilisées. Un trop grand nombre de couches posera des problèmes sur l'occupation mémoire et le temps de rendu tandis qu'un nombre trop faible entraînera une perte de précision sur la représentativité. Si la carte d'aire relative est tabulée, il faut alors définir la résolution en fonction de la taille des rayures. Si la résolution n'est pas suffisante, les rayures seront moins bien représentées tandis qu'une résolution trop grande impliquera un coût mémoire supplémentaire inutile. Le profil de rayure utilisé pour calculer la BRDF devrait également être choisi en fonction des données. Si l'implémentation du rendu le permet, nous pourrions augmenter la précision en spécifiant une BRDF, et donc un profil, pour chaque couche de rayures. Les données ne suffiraient toutefois sûrement pas à couvrir la totalité de la surface et il faudrait alors être capable de générer le reste de la texture à partir de notre échantillon [WLKT09].

3.5.5 Comparaisons

Comme la méthode repose sur une simulation numérique, l'absence de comparaison avec un matériau réel constitue l'une de ses principales limitations. La validation de modèles virtuels est un champ de recherche à part entière. Il est possible de valider différents éléments du modèle mais aussi de les comparer aux mesures sur différents points.

BRDF La partie BRDF peut être validée indépendamment du reste du modèle. Le test consiste à vérifier que pour un profil de rayure donné, la BRDF calculée avec notre modèle correspond à la BRDF mesurée. Notre BRDF serait calculée à partir d'un profil de BRDF mesuré à l'aide d'un profilomètre de la même manière que dans l'article de Mérillou [MDG01]. Elle serait alors comparée avec la BRDF mesurée à l'aide d'un gonio-réfectomètre. La première difficulté réside dans la capture de la BRDF anisotrope qui est difficile à cause des hautes fréquences angulaires mais aussi problématique aux angles rasants. Cette comparaison ressemble à la validation présentée dans l'article de Dong [DWMG15] qui compare les BRDF mesurées et simulées. Dans l'article, les données ne sont comparées que pour une sous-partie des angles de vue et de lumières à cause des limitations du système de capture. Dans ces conditions de comparaison, nous pourrions alors vérifier que les différentes hypothèses que nous avons faites ne déservent pas le réalisme de notre modèle. La comparaison de notre modèle avec celui de Mérillou [MDG01] et de Dong [DWMG15] est aussi une piste intéressante pour sa validation.

Photographie Pour s'assurer que notre modèle de SV-BRDF représente efficacement la réalité, il faudrait le comparer à des photographies de matériaux brossés ou rayés. Pour pouvoir obtenir une image similaire, il faut que tous les paramètres de la scène soient sensiblement les mêmes que ceux de la photographie. Cela implique que l'objet, l'éclairage et les paramètres de la caméra soient reproduits quasiment à l'identique, ce qui représente déjà un défi. Mais une fois les paramètres de la scène calqués, il faut encore configurer le modèle de SV-BRDF pour qu'il reproduise l'apparence de l'objet. Pour cela nous avons encore deux degrés de libertés. D'abord, il faut s'assurer que la BRDF des rayures soit la même. L'approche de Mérillou consistant à mesurer la forme du profil serait ici la solution la plus efficace, mais nécessiterait alors que le modèle de BRDF au moins soit validé. Une autre solution viserait à mesurer la BRDF et à l'exprimer dans notre paramétrisation pour la réutiliser dans le modèle de variations spatiales. La principale difficulté pour cette comparaison est sûrement de configurer les motifs de rayures. Il faudrait parvenir à imiter au mieux la disposition de l'échantillon utilisé pour la comparaison.

Chapitre 4

Optimisation de l'orientation des BRDF pour la manipulation des reflets anisotropes

Ce chapitre est basé sur les articles que nous avons présentés à Eurographics 2014 [RGB⁺14] et à l'Afig 2012 [RBG12]. Il présente une méthode d'édition de l'apparence des reflets anisotropes basée sur la modification du *champ d'orientation de la BRDF*.

Dans le chapitre précédent nous avons vu que les réflexions produites par des matériaux anisotropes sont toutes contenues dans le cône de réflexion. Au niveau de l'apparence, cette propriété implique que les reflets sur les matériaux anisotropes forment la plupart du temps des courbes à la surface de l'objet. Notre modèle de BRDF permet donc de définir le comportement le long de ces courbes de reflet.

Dans ce nouveau chapitre, l'objectif n'est alors plus de modifier la BRDF mais d'utiliser son champ d'orientation pour contrôler l'apparence. Nous allons une étape plus en avant en proposant des outils de contrôle inverse d'édition comme ceux que nous avons vus dans la section 2.3.2.

Dans un premier temps, nous analysons le lien entre l'orientation de la BRDF et la direction des courbes de réflexions anisotropes. Ensuite nous inversons le problème en proposant un solveur qui permet de retrouver les orientations de BRDF qui produisent le reflet anisotrope que l'utilisateur a spécifié. A partir du solveur et du lien entre l'orientation de la BRDF et la direction du reflet, nous proposons des outils d'édition de la forme des reflets.

4.1 La forme des reflets anisotropes

La section 4.1.1 présente plus précisément les BRDF anisotropes selon la théorie des micro-facettes [TS67]. La théorie des micro-facettes nous permet ici d'isoler les contraintes suffisantes pour expliquer le lien entre l'orientation de la micro-géométrie et les reflets anisotropes. Ensuite, une analyse différentielle permet d'exprimer les tangentes du reflet anisotrope selon les propriétés locales de la surface dans la section 4.1.2. Pour plus de lisibilité nous ferons référence à la tangente du reflet anisotrope en la nommant *tangente spéculaire*.

4.1.1 La théorie des micro-facettes

La théorie part du principe que la surface est constituée d'une distribution de microscopiques facettes spéculaires (miroir parfait). Les différentes BRDF sont obtenues en faisant varier cette distribution : pour la plupart des modèles existants, les micro-facettes sont orientées autour de la normale de la surface \mathbf{n} . Pour obtenir une BRDF anisotrope, la distribution doit donc aussi être anisotrope. Un choix typique est de considérer la distribution extrudée le long de la direction tangentielle \mathbf{u} comme nous l'avons fait en définissant la direction des rayures dans le chapitre précédent. Bien que ces choix correspondent à beaucoup de matériaux, certains comme le velours nécessitent des distributions d'un type différent [APS00] et ne sont donc pas considérés dans cette étude.

La théorie des micro-facettes se comprend mieux lorsqu'on cherche les situations où la BRDF a une réponse maximale (i.e., lorsqu'elle produit un reflet). En tant que miroir parfait, une micro-facette réfléchit la lumière vers un point de vue seulement lorsque sa normale coïncide avec \mathbf{h} qui, nous le rappelons, est la bissectrice entre la direction de lumière ω_{in} et la direction de vue ω_{out} et

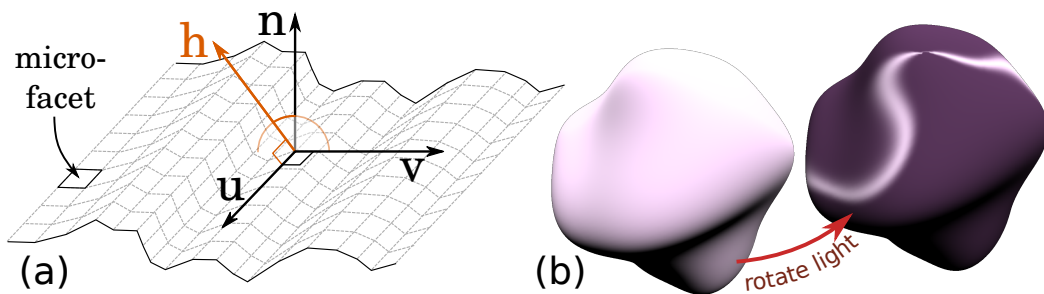


FIGURE 4.1 – (a) une distribution de micro-facettes idéalement extrudée : les reflets apparaissent seulement lorsque \mathbf{h} est sur le plan perpendiculaire à \mathbf{u} . (b) Orienter \mathbf{u} perpendiculairement à \mathbf{h} sur toute la surface provoque un reflet fort et uniforme qui se transforme rapidement en courbe lorsque la direction de lumière change.

4. Optimisation de l'orientation des BRDF pour la manipulation des reflets anisotropes

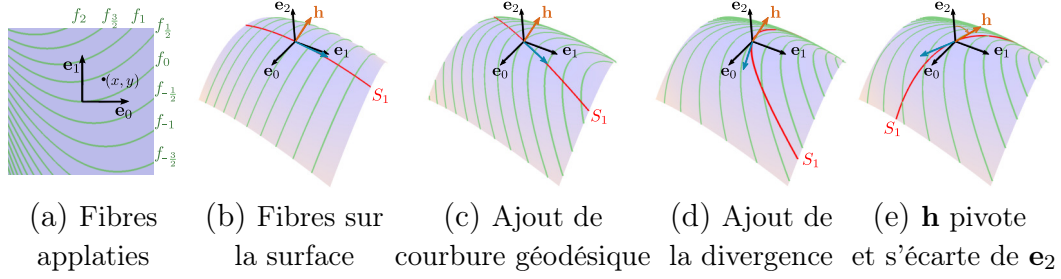


FIGURE 4.2 – (a) Un sous-ensemble (en vert) d'une famille de fibres ($a = 1.4$, $b = 0.8$) sur le plan. (b) Les fibres droites plaquées sur la surface 3D ($c_{20} = -1.0$, $c_{11} = 0.1$, $c_{02} = -0.3$) produisent une courbe spéculaire (en rouge) dont les directions tangentés (en cyan) sont quasiment orthogonales aux fibres. (c-d) Lorsque les fibres se courbent ($a = 1.4$), et divergent ($b = 0.8$), la courbe spéculaire tourne considérablement et les directions tangentés s'alignent pratiquement sur les fibres. (e) Modifier $\theta_{\mathbf{h}}$ de 0.5 à 0.8 radians fait également tourner la courbe spéculaire sur le plan tangent.

se calcule $\mathbf{h} = (\omega_{in} + \omega_{out}) / \|\omega_{in} + \omega_{out}\|$. Lorsque la distribution est extrudée, la plupart des normales des micro-facettes sont orthogonales à \mathbf{u} . Par conséquent, pour une élévation constante donnée (i.e., $\mathbf{h}^T \mathbf{n} = \text{const}$), la réflectance est maximisée lorsque $\mathbf{h}^T \mathbf{u} = 0$. La figure 4.1 (a) illustre le cas où *toutes* les micro-facettes sont orthogonales à \mathbf{u} . Dans le cas le plus extrême, la réflectance est différente de zéro seulement dans le cas où \mathbf{h} est dans le plan créé par \mathbf{n} et le vecteur $\mathbf{v} = \mathbf{n} \times \mathbf{u}$.

Cette observation initiale permet déjà de manipuler les reflets anisotropes : trouver une direction \mathbf{u}^* qui maximise la réflectance en tous points de la surface. \mathbf{u}^* doit être tangent à la surface et la réflexion apparaît lorsque $\mathbf{h}^T \mathbf{u}^*$ est égal à 0. En combinant ces contraintes, deux solutions seulement émergent : $\mathbf{u}^* = \pm \mathbf{h} \times \mathbf{n}$. Un résultat est montré dans la figure 4.1 (b), les reflets anisotropes de cette configuration particulière disparaissent aussitôt que les conditions de vue changent. Cette instabilité vient du fait que les reflets anisotropes classiques sont des *courbes* alors que des *régions* de reflets anisotropes correspondent à des cas dégénérés. La section suivant est dédiée à l'étude de ce que nous appelons par soucis de simplicité des *courbes de reflet*.

4.1.2 Analyse différentielle

Fibres spéculaires. Afin de mieux comprendre la forme des reflets anisotropes, Lu et al. ont effectué une analyse différentielle dans un cas simplifié [LKK99, LKK00]. Ils considèrent une surface constituée de fibres, de cheveux ou de rainures alignés avec $\mathbf{e}_0 = (1, 0, 0)^T$. Ils utilisent une approximation

du second ordre pour la forme des fibres et du champ de hauteur de la surface. Les directions de vue et de lumière sont considérées constantes, avec \mathbf{h} dans le plan orthogonal à \mathbf{e}_0 (i.e., $\mathbf{h} = (0, \sin \theta_{\mathbf{h}}, \cos \theta_{\mathbf{h}})^T$). Ensemble, ces choix de conception simplifient l'analyse car ils permettent l'apparition d'une seule ligne de reflet passant par l'origine, pour laquelle une forme analytique peut être trouvée. Un rappel de leur approche est présenté avec nos notations à la figure 4.2.

La forme des fibres $f_y : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^2$ est approchée par :

$$f_y(x) := \left[x, y + \frac{ax^2}{2} + bxy \right]^T,$$

où a et b désignent respectivement la courbure géodésique et la divergence dans le plan tangent. En variant y , l'ensemble des fibres est balayé comme le montre la figure 4.2 (a). Comme il n'y a pas d'espacement entre les fibres, le terme y^2 est ignoré.

Le champ de hauteur de la surface est approché par :

$$z(x, y) := \frac{c_{20}x^2 + 2c_{11}xy + c_{02}y^2}{2},$$

où c_{20} , c_{11} et c_{02} sont les coefficients de second ordre qui désignent la courbure de la surface.

Lu et al. dérivent deux formules différentes pour représenter la courbe de reflet $S_{1,2} : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^3$, utilisant des paramétrisations particulières. Comme [LKK00] le détaille, les deux conduisent à la même *direction* tangente à l'origine. Ainsi, en utilisant x comme paramètre :

$$\left. \frac{dS_1(x)}{dx} \right|_{x=0} = \left[1, -\frac{a \sin \theta_{\mathbf{h}} + c_{20} \cos \theta_{\mathbf{h}}}{b \sin \theta_{\mathbf{h}} + c_{11} \cos \theta_{\mathbf{h}}}, 0 \right]^T. \quad (4.1)$$

Comme le montre la figure 4.2 (b)-(e), la courbe de reflet et sa direction tangente varient significativement avec la courbure de la surface, la forme des fibres et l'élévation de \mathbf{h} . Lu et al. fournissent une étude de ces courbes de reflet dans le cas de primitives géométriques simples et une étude détaillée des cas dégénérés, mais ils ne fournissent pas de solution pour des objets de formes arbitraires.

Extension pour des surfaces arbitraires. Dans notre approche, la surface de l'objet est décrite par une fonction 2D. Les orientations des BRDF sont contrôlées par un champ de direction $\mathbf{u} : \mathcal{M} \rightarrow T\mathcal{M}$ où $T\mathcal{M}$ représente le fibré tangent des vecteurs sur la surface. Dans cette configuration générale, l'équation 4.1 ne peut pas être utilisée directement afin de déterminer la tangente spéculaire pour trois raisons.

Tout d'abord, la direction des fibres à l'origine est fixée à \mathbf{e}_0 . Dans notre cas, cela revient à fixer \mathbf{u} alors que c'est précisément ce qui devrait varier. Nous avons donc ré-exprimé l'équation 4.1 en fonction de \mathbf{u} . L'objectif suivant est alors d'exprimer la tangente spéculaire comme un vecteur en coordonnées monde $\ell(\mathbf{u}) \in T\mathcal{M}$.

Ensuite, les matériaux anisotropes ne doivent plus être modélisés par des fibres mais plus généralement comme des distributions de micro-facettes allongées. Les fibres individuelles peuvent être vues comme des canaux du champ de directions \mathbf{u} . La courbure géodésique et normale des fibres sont donc les équivalents de la magnitude du rotationnel et de la divergence de \mathbf{u} .

$$a = |\nabla \times \mathbf{u}| \quad b = \nabla \cdot \mathbf{u}, \quad (4.2)$$

où $|\nabla \times \mathbf{u}| := (\nabla \times \mathbf{u})^T \mathbf{n}$ est utilisé comme une notation abrégée. Autrement dit, a représente la courbure des fibres sur la surface tandis que b représente les compressions et dilatations du champ.

La surface est représentée par un champ de hauteur quadratique défini à partir de la direction des fibres. D'après la géométrie différentielle élémentaire [dC76], c'est équivalent à calculer la courbure κ et la torsion τ dans la direction de \mathbf{u} :

$$c_{20} = \kappa(\mathbf{u}) \quad c_{11} = \tau(\mathbf{u}). \quad (4.3)$$

En associant ces éléments, nous réécrivons l'équation 4.1 comme un champ de tangentes spéculaires *non orienté* $\ell : T\mathcal{M} \rightarrow T\mathcal{M}$. L'ambiguïté de l'orientation vient du fait que la courbe de reflet n'a pas de paramétrisation intrinsèque.

L'équation 4.1 est d'abord multipliée par le dénominateur de la coordonnée y pour éviter les cas dégénérés. Ensuite, en utilisant les équations 4.2 et 4.3 et en remplaçant les (co)sinus par des produits scalaires, nous obtenons l'équation suivante :

$$\ell(\mathbf{u}) = \pm \mathbf{U} \begin{bmatrix} (-\nabla \cdot \mathbf{u}) & \mathbf{h}^T \mathbf{v} - \tau(\mathbf{u}) & \mathbf{h}^T \mathbf{n} \\ |\nabla \times \mathbf{u}| & \mathbf{h}^T \mathbf{v} + \kappa(\mathbf{u}) & \mathbf{h}^T \mathbf{n} \\ 0 & & \end{bmatrix},$$

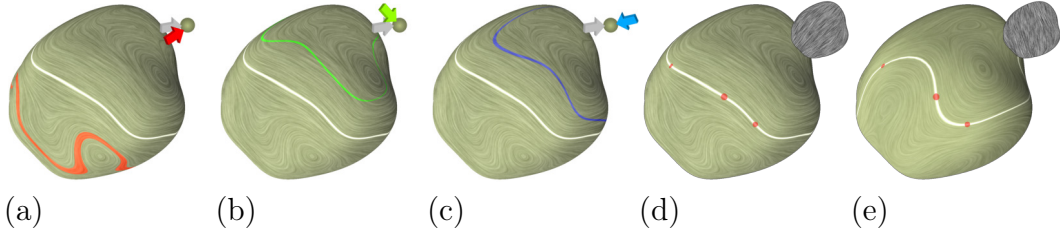


FIGURE 4.3 – (a-c) Le champ des tangentes de reflet ℓ d'une lumière blanche choisie est visualisé en utilisant le Line Integral Convolution [CL93] puis comparé à la courbe anisotrope de trois autres directions de lumières (en rouge, vert et bleu) : plus la direction est proche de la lumière blanche et mieux ℓ caractérise la forme du reflet. (d-e) Les points de passage obligatoires par lesquels la courbe anisotrope passe indépendamment de la direction \mathbf{u} sont affichés en rouge ($\mathbf{h}^T \mathbf{n} > 0.9995$).

où $\mathbf{U} = [\mathbf{u} \ \mathbf{v} \ \mathbf{n}]$ est une transformation de coordonnées locales en coordonnées monde. En isolant \mathbf{h} nous obtenons :

$$\ell(\mathbf{u}) = \pm \mathbf{U} \begin{bmatrix} 0 & -\nabla \cdot \mathbf{u} & -\tau(\mathbf{u}) \\ 0 & |\nabla \times \mathbf{u}| & \kappa(\mathbf{u}) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{U}^T \mathbf{h}. \quad (4.4)$$

Il est important que la tangente spéculaire ne soit *pas* un vecteur unitaire car la longueur du vecteur permet de caractériser les cas dégénérés de la figure 4.1 (b), qui arrivent lorsque $\ell(\mathbf{u}) = 0$.

Courbes de reflet potentiel Une implication de l'équation 4.4 est qu'elle permet de caractériser les tangentes spéculaires *potentielles*. En effet, la première colonne de la matrice centrale se comporte comme une projection de \mathbf{h} sur le plan orthogonal à \mathbf{u} . C'est ainsi équivalent (à un coefficient multiplicateur près) à la tangente spéculaire qui serait obtenue par une direction de lumière proche. La conséquence importante est donc que les tangentes spéculaires vont rester cohérentes pour de faibles changements de direction de vue ou de lumière comme le montre la figure 4.3 (a)-(c).

Par conséquent, l'équation 4.4 permet de déduire que, en variant \mathbf{u} , ce n'est pas seulement la trajectoire spéculaire de la lumière choisie qui va dévier, mais aussi toutes les courbes de reflet *potentiel* autour d'elle. L'édition précise des reflets peut se faire seulement grâce à cette propriété fondamentale.

Les courbes de reflet potentiel possèdent certains points de passage critiques lorsque $\mathbf{h} = \mathbf{n}$. Un reflet spéculaire sera en effet contraint de passer sur ces points car dans ce cas, $\mathbf{h}^T \mathbf{u} = 0 \ \forall \mathbf{u}$. Ces points critiques sont présents pour

une raison simple, ils correspondent au pic de réflexion d'un reflet *isotrope* classique. Par conséquent, faire varier \mathbf{u} n'aura pas d'effet sur la position de ce point critique comme le montre la figure 4.3 (d)-(e). Comme le montre l'équation 4.4, les modifications des tangentes spéculaires se font seulement grâce à leur dépendance à la courbure géodésique.

4.2 Orientation de la BRDF en fonction des tangentes spéculaires

L'objectif est maintenant de trouver un champ d'orientation de BRDF \mathbf{u} afin que les tangentes spéculaires potentielles $\boldsymbol{\ell}(\mathbf{u})$ données par l'équation 4.4 correspondent aux tangentes cibles données par l'utilisateur $\boldsymbol{\ell}^*$.

Les méthodes pour spécifier les tangentes cibles sont décrites dans la section 4.3. Nous formulons le problème comme une minimisation d'énergie aux moindres carrés.

$$E_{\boldsymbol{\ell}}(\mathbf{u}) = \int_{\mathcal{M}} \|\mathbf{L}(\mathbf{u}) - \mathbf{L}^*\|^2 dA, \quad (4.5)$$

où les tangentes spéculaires non orientées sont représentées par des tenseurs normalisés de la forme $\mathbf{L} = \boldsymbol{\ell}\boldsymbol{\ell}^T / \|\boldsymbol{\ell}\|^2$. Ensemble, les équations 4.4 et 4.5 constituent un problème d'optimisation hautement non linéaire. La première difficulté est de s'assurer de résoudre le problème pour des vecteurs \mathbf{u} unitaires.

4.2.1 Représentation angulaire

Nous fournissons ici les détails de la réécriture de l'équation 4.4 en termes angulaires qui conduit à l'équation 4.10.

Soit $[\mathbf{t}, \mathbf{b}, \mathbf{n}]$ un champ de repères tangents arbitraires. Le champ de direction \mathbf{u} est représenté comme un champ scalaire $\varphi : \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R}$, qui définit \mathbf{u} comme une rotation de φ radians autour de \mathbf{n} . Dans le plan $[\mathbf{t}, \mathbf{b}]$, c'est équivalent à la rotation 2D $[\bar{\mathbf{u}} \ \bar{\mathbf{v}}]$ où $\bar{\mathbf{u}}$ et $\bar{\mathbf{v}}$ sont les versions 2D de \mathbf{u} et \mathbf{v} respectivement :

$$\bar{\mathbf{u}}(\varphi) = [\cos \varphi \ \sin \varphi]^T \quad \bar{\mathbf{v}}(\varphi) = [-\sin \varphi \ \cos \varphi]^T. \quad (4.6)$$

Nous exprimons tout d'abord le repère tangent $\mathbf{U} = [\mathbf{u} \ \mathbf{v} \ \mathbf{n}]$ en termes angulaires $\bar{\mathbf{u}}(\varphi)$ et $\bar{\mathbf{v}}(\varphi)$. Nous enlevons la dépendance à φ afin de conserver la lisibilité :

$$\mathbf{U} = [\mathbf{t} \ \mathbf{b} \ \mathbf{n}] \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{u}} & \bar{\mathbf{v}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Introduire cette formule dans l'équation 4.4 en enlevant les zéros évidents nous donne :

$$\ell(\varphi) = \pm [\mathbf{t} \ \mathbf{b}] [\bar{\mathbf{u}} \ \bar{\mathbf{v}}] \begin{bmatrix} (-\nabla \cdot \bar{\mathbf{u}}) \bar{\mathbf{v}}^T & -\tau(\bar{\mathbf{u}}) \\ (\nabla \times \bar{\mathbf{u}}) \bar{\mathbf{v}}^T & \kappa(\bar{\mathbf{u}}) \end{bmatrix} [\mathbf{t} \ \mathbf{b} \ \mathbf{n}]^T \mathbf{h}. \quad (4.7)$$

Nous observons à partir de l'équation 4.6 que le Jacobien de $\bar{\mathbf{u}}$ vérifie $\mathbf{J} = \bar{\mathbf{v}} \nabla \varphi^T$, la divergence de $\bar{\mathbf{u}}$ en termes angulaires φ est $\nabla \cdot \bar{\mathbf{u}} = \text{tr}(\mathbf{J}) = \bar{\mathbf{v}}^T \nabla \varphi$. Comme le rotationnel de $\bar{\mathbf{u}}$ correspond également à la divergence de $\bar{\mathbf{v}}$, par le même raisonnement, nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} -\nabla \cdot \bar{\mathbf{u}} \\ \nabla \times \bar{\mathbf{u}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\bar{\mathbf{v}}^T \\ \bar{\mathbf{u}}^T \end{bmatrix} \nabla \varphi. \quad (4.8)$$

De plus, la courbure κ et la torsion τ de la surface dans la direction $\bar{\mathbf{u}}(\varphi)$ sont calculées en utilisant l'application de Weingarten 2×2 \mathbf{W} [dC76], donc :

$$\begin{bmatrix} -\tau(\bar{\mathbf{u}}) \\ \kappa(\bar{\mathbf{u}}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\bar{\mathbf{v}}^T \\ \bar{\mathbf{u}}^T \end{bmatrix} \mathbf{W} \bar{\mathbf{u}}. \quad (4.9)$$

Enfin, en insérant les équations 4.8 et 4.9 dans l'équation 4.7 et en se servant du fait que $[\bar{\mathbf{u}} \ \bar{\mathbf{v}}][-\bar{\mathbf{v}} \ \bar{\mathbf{u}}]^T$ est une rotation de $\pi/2$, nous obtenons l'expression angulaire suivante :

$$\boxed{\ell(\varphi) = \pm [\mathbf{b} \ -\mathbf{t}] [\nabla \varphi \ \bar{\mathbf{v}}(\varphi)^T \ \mathbf{W} \bar{\mathbf{u}}(\varphi)] [\mathbf{t} \ \mathbf{b} \ \mathbf{n}]^T \mathbf{h}}, \quad (4.10)$$

où \mathbf{W} est l'application de Weingarten 2×2 , et $\nabla \varphi$ est le vecteur de gradient 2D des dérivées covariantes.

4.2.2 Configuration discrète

Soit la surface \mathcal{M} représentée comme un maillage avec des positions de sommets \mathbf{p}_i , de normales \mathbf{n}_i et une base de tangentes unitaires \mathbf{t}_i et \mathbf{b}_i . Le problème d'optimisation devient :

$$\varphi^* = \arg \min_{\varphi} \|\mathbf{E}(\varphi)\|^2, \quad \mathbf{E}_i(\varphi) = A_i^{\frac{1}{2}} \|\mathbf{L}_i(\varphi) - \mathbf{L}_i^*\|^2, \quad (4.11)$$

où A_i est l'aire des cellules de Voronoï autour du sommet i , et $\mathbf{L}_i(\varphi)$ est sa tangente spéculaire potentielle sous sa forme tensorielle à partir de φ (via l'équation 4.10). Le gradient $\nabla \varphi_i$ et l'application de Weingarten \mathbf{W}_i doivent être calculés pour chaque sommet i .

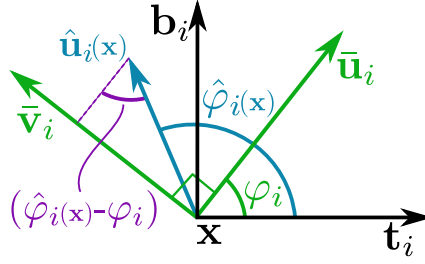


FIGURE 4.4 – Représentation polaire des orientations.

Soit $\nabla\varphi_i$, l'approximation au premier ordre $\hat{\mathbf{u}}_i(\mathbf{x}) = \bar{\mathbf{u}}_i + \mathbf{J}_i\mathbf{x}$ du champ de vecteurs $\bar{\mathbf{u}}$ autour de \mathbf{p}_i exprimée dans la base $[\mathbf{t}_i, \mathbf{b}_i]$. En utilisant l'équation 4.6, nous ré-exprimons le Jacobien comme $\mathbf{J}_i = \bar{\mathbf{v}}_i \nabla\varphi_i^T$ afin de montrer explicitement que toutes les variations au premier ordre de $\bar{\mathbf{u}}$ autour de \mathbf{p}_i se produisent le long de $\bar{\mathbf{v}}_i$. La projection de l'approximation sur $\bar{\mathbf{v}}_i$ permet d'obtenir $\bar{\mathbf{v}}_i^T \hat{\mathbf{u}}_i(\mathbf{x}) = \nabla\varphi_i^T \mathbf{x}$. Avec la représentation polaire de $\hat{\mathbf{u}}$ nous obtenons :

$$\|\hat{\mathbf{u}}_i(\mathbf{x})\| \sin(\hat{\varphi}_i(\mathbf{x}) - \varphi_i) = \nabla\varphi_i^T \mathbf{x} . \quad (4.12)$$

Comme cette équation est linéaire, nous l'estimons à l'aide d'une régression linéaire standard sur les sommets j du premier voisinage de i pour trouver le gradient inconnu $\nabla\varphi_i$:

$$\nabla\varphi_i = \frac{1}{k} \arg \min_{\phi \in \mathbb{R}^2} \sum_j (\phi^T \mathbf{p}_j^i - \sin(k(\varphi_j^i - \varphi_i)))^2 , \quad (4.13)$$

où $k = 1$ (respectivement $k = 2$) est utilisé pour des BRDFs asymétriques (respectivement symétriques) (voir section 4.2.4), $\mathbf{p}_j^i = [\mathbf{t}_i \ \mathbf{b}_i]^T (\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i)$ et φ_j^i correspond à \mathbf{p}_j et φ_j exprimé dans le repère tangent du sommet i . Même si le premier est obtenu à l'aide d'une simple projection orthogonale, le dernier doit être transporté parallèlement pour éviter toute rotation dans le plan. Pour ce faire, nous avons utilisé la méthode de Knöppel et al. [KCPS13] car elle a l'avantage d'être linéaire sur φ . Il est important de noter que puisque le transport parallèle préserve les longueurs et que des vecteurs unitaires sont utilisés, la méthode garantit $\|\hat{\mathbf{u}}_i(\mathbf{x})\| = 1$ pour tous les sommets i de l'équation 4.12.

De nombreuses approches existent afin de calculer l'application de Weingarten \mathbf{W}_i . Comme précédemment, les coefficients de \mathbf{W}_i sont directement calculés en effectuant une régression polynomiale de degré 2 $\mathbf{x}^T \mathbf{W}_i \mathbf{x}$ en utilisant les composantes d'élévations $\mathbf{n}_i^T (\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i)$ des sommets voisins. Cette approche peut être vue comme une variante de la méthode *osculating jet* [CP03].

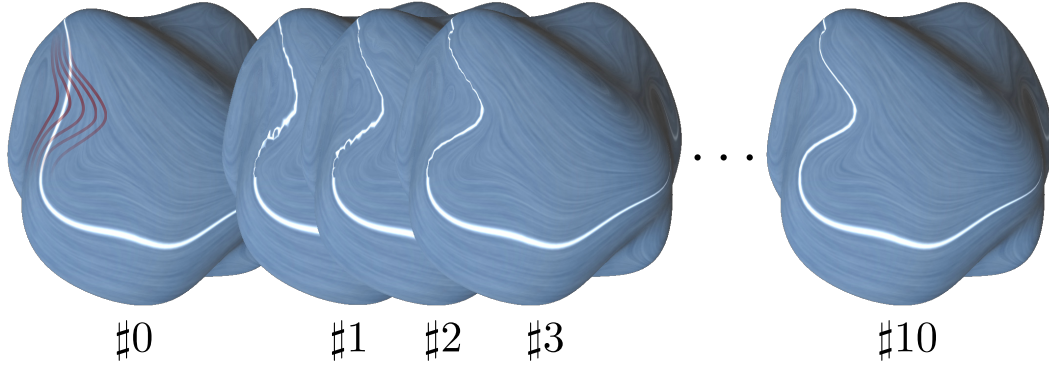
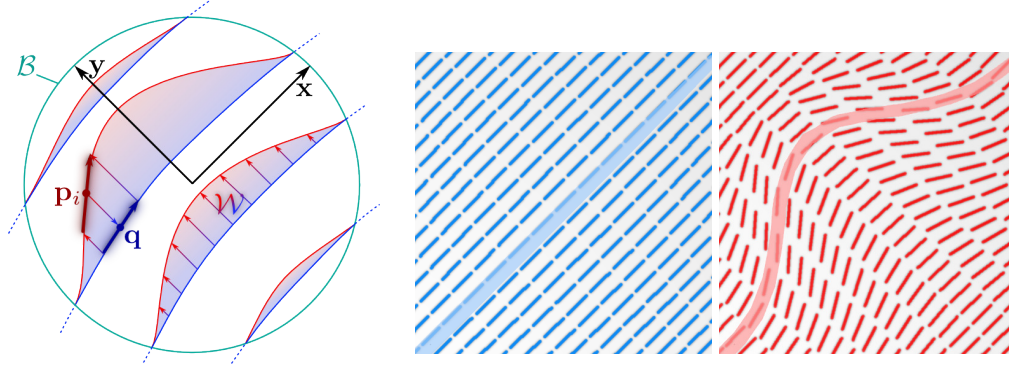


FIGURE 4.5 – En partant d’un champ de direction initial et d’un champ de tangentes spéculaires potentielles (montré avec les courbes rouges), seules quelques itérations du solveur sont nécessaires pour que la solution converge. Ici, 10 itérations sont nécessaires.

4.2.3 Optimisation non-linéaire

Tous les ingrédients sont maintenant réunis pour résoudre la minimisation de l’équation 4.11. C’est un problème non linéaire d’optimisation aux moindres carrées qui peut être résolu en utilisant la méthode de Levenberg-Marquardt (LM) [Mar63]. Un tel solveur nécessite la Jacobienne de $\mathbf{E}(\varphi)$, qui dans notre cas est une matrice très creuse avec une anti-diagonale non nulle à cause de l’expression de $\nabla\varphi_i$. Cette matrice possède la même structure qu’une matrice Laplacienne, ce qui permet d’accélérer le calcul de la Jacobienne pour chaque itération du solveur. Dans nos tests, LM permet d’être considérablement plus efficace qu’une méthode utilisant seulement le gradient, telle que la méthode du gradient conjugué ou L-BFGS [BLNZ95].

Comme dans tous les cas d’énergies non convexes, le problème nécessite une solution initiale proche. Comme l’objectif de la méthode est de manipuler des reflets existants, c’est le champ de direction avant l’édition qui servira de point de départ. De plus, afin d’éviter d’introduire des singularités dans le champ de direction édité, nous appliquons un lissage Laplacien à φ^* à chaque étape. Cette stratégie entrelacée permet d’introduire de larges variations dans le champ si l’utilisateur le désire. Nous avons testé l’ajout du Laplacien en tant que terme de régularisation dans le solveur mais il présente le désavantage de trop lisser les résultats, ce qui empêche d’atteindre la solution désirée. La continuité du champ de direction est quant à elle assurée tant que le champ de tangentes spéculaires cible est continu. La figure 4.5 montre quelques itérations du solveur, qui converge la plupart du temps en moins de 10 itérations. Le pseudo-code suivant résume cette approche :



(a) Paramétrisation de la Torsion (b) Avant la torsion (c) Après la torsion

FIGURE 4.6 – (a) La fonction de torsion \mathcal{W} des reflets potentiels est appliquée sur son support \mathcal{B} en modifiant les tangentes à l'aide de l'inverse et de la Jacobienne de \mathcal{W} . (b-c) Sur un maillage, le champ de tangentes des reflets initiaux (en bleu) est déformé pour atteindre le champ ciblé (en rouge).

```

 $\ell^* \leftarrow \text{edit}(\ell)$ 
 $\varphi^* \leftarrow \text{polar}(\mathbf{u})$  ▷ eq. -16
while ( $\|\mathbf{E}(\varphi)\| < \epsilon$ ) do ▷ eq. 7, 8
     $\varphi^* \leftarrow LM_1(\varphi^*, \mathbf{E}(\varphi), \text{Jac}(\mathbf{E}(\varphi)))$ 
     $\varphi^* \leftarrow \text{smooth}(\varphi^*)$ 
end while
return  $\mathbf{u}(\varphi^*)$  ▷ eq. 6

```

Ici, LM_1 correspond à une itération de l'algorithme de Levenberg-Marquardt. $\nabla\varphi^*$ (eq. 10) doit être recalculée à chaque itération.

4.2.4 BRDF symétrique

De manière générale, l'orientation des BRDF anisotropes est déterminée par le vecteur \mathbf{u} . Toutefois, beaucoup de modèles de BRDF sont définis par des distributions de micro-facettes possédant une symétrie centrale (e.g., [War92, LKK00, APS00]). Dans ce cas, \mathbf{u} peut être considéré comme non orienté, autrement dit, φ est défini modulo π .

Utiliser un \mathbf{u} non orienté nécessite deux modifications dans l'implémentation. Tout d'abord, dans le calcul de $\nabla\varphi$ de l'équation 4.13, k doit être égal à 2. De plus, nous effectuons une interpolation non orientée de \mathbf{u} dans le triangle. Pour ce faire nous effectuons l'interpolation du tenseur $\mathbf{u}\mathbf{u}^t$ lors du rendu de la BRDF. Une fois interpolé, les valeurs propres du tenseur correspondent au vecteur \mathbf{u} correctement interpolé. Le reste de l'approche reste la même.

4.3 Outils de manipulation des reflets

Une solution pour spécifier des tangentes spéculaires pourrait être d'utiliser des méthodes de création de champs de tangentes (e.g., [KCPS13]). Néanmoins, afin de s'approcher de la métaphore de modification des reflets et pour avoir une solution initiale viable pour l'optimisation, nous avons choisi une solution d'édition similaire à celle de Gingold [GZ08].

Plutôt que de manipuler des tangentes spéculaires, l'outil proposé permet de donner *l'illusion de déformer les reflets eux-mêmes*. Chaque outil est basé sur un support de brosse $\mathcal{B} \subset \mathcal{M}$ pour que seuls les points $\mathbf{p}_i \in \mathcal{B}$ soient affectés. Ainsi, les points d'entrées et de sorties de la courbe spéculaire qui passent dans l'empreinte de la brosse ne changent pas. C'est également vrai pour les points critiques.

Le panel d'outils que nous présentons a pour but de démontrer l'approche et pourrait être élargi pour une application finale. Tous les outils utilisent un support de brosse avec une paramétrisation planaire, obtenue en effectuant une régression linéaire des points de la brosse \mathcal{B} sur un plan. Leurs effets sur des reflets simples sont rendus en utilisant quelques sources lumineuses et le modèle de BRDF d'Ashikhmin avec une distribution Gaussienne des micro-facettes [APS00]. Pour améliorer la lisibilité des illustrations, nous accentuons l'intensité des reflets, ce qui altère le réalisme de l'apparence des matériaux.

Outils de déformation. La première catégorie d'outils proposée permet de déformer les reflets à l'aide d'un opérateur de déformation $\mathcal{W} : \mathcal{B} \rightarrow \mathcal{B}$. Comme \mathcal{W} est différentiable et bijective, il est possible de trouver des tangentes spéculaires qui entraîneront la déformation voulue. La figure 4.6 illustre le procédé de cet outil où la tangente spéculaire au point \mathbf{p}_i est obtenue par $\ell_i^* = \mathbf{J}_{\mathcal{W}}(\mathbf{q}) \ell_{\mathbf{q}}$ avec $\mathbf{q} = \mathcal{W}^{-1}(\mathbf{p}_i)$, $\ell_{\mathbf{q}}$ la tangente spéculaire \mathbf{q} et $\mathbf{J}_{\mathcal{W}}$ la Jacobienne de \mathcal{W} .

Nous illustrons cette approche à l'aide de deux opérateurs qui utilisent une fonction d'atténuation commune : $w(x, y) = (1 - x^2 - y^2)^2$. L'outil *bend* tord les reflets dans la direction positive \mathbf{y} de la brosse. Il est défini par $\mathcal{W}_b(x, y) = [x, y + w(x, y)/2]$ et est montré dans la figure 4.7. L'outil *expand* étire les reflets le long de \mathbf{y} dans les deux directions. Il est défini par $\mathcal{W}_e(x, y) = [x, y + w(x, y) \operatorname{sign}(y) \sqrt{\sin(y)}/2]$ et est montré dans la figure 4.8.

Il est important de souligner qu'une faible modification de \mathbf{u} entraîne d'importants changements de ℓ dans ces deux cas. L'usage de cet outil est similaire à la méthode de Ritschel et al. [ROTS09], sauf que notre cas se base sur une

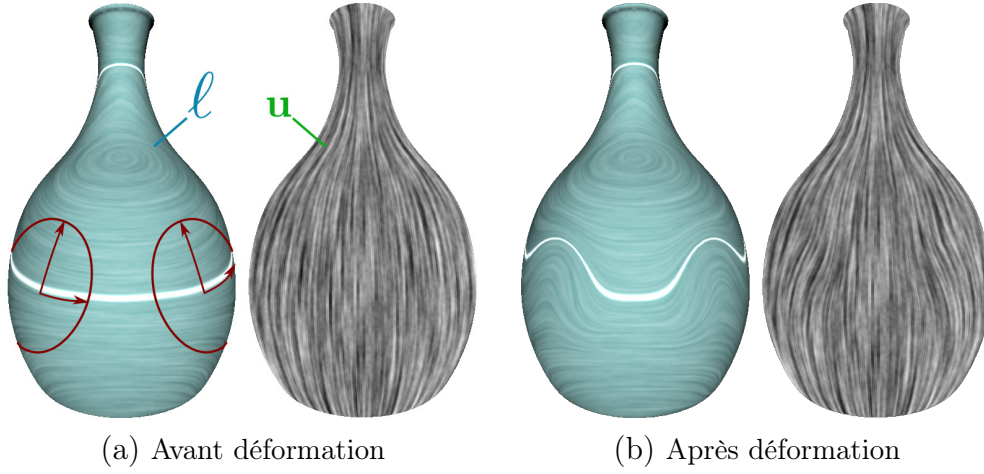


FIGURE 4.7 – (a) L'outil `bend` est appliqué sur l'objet dans la zone du reflet spéculaire et entraîne (b) un nouveau champ de tangentes spéculaires avec la déformation voulue.

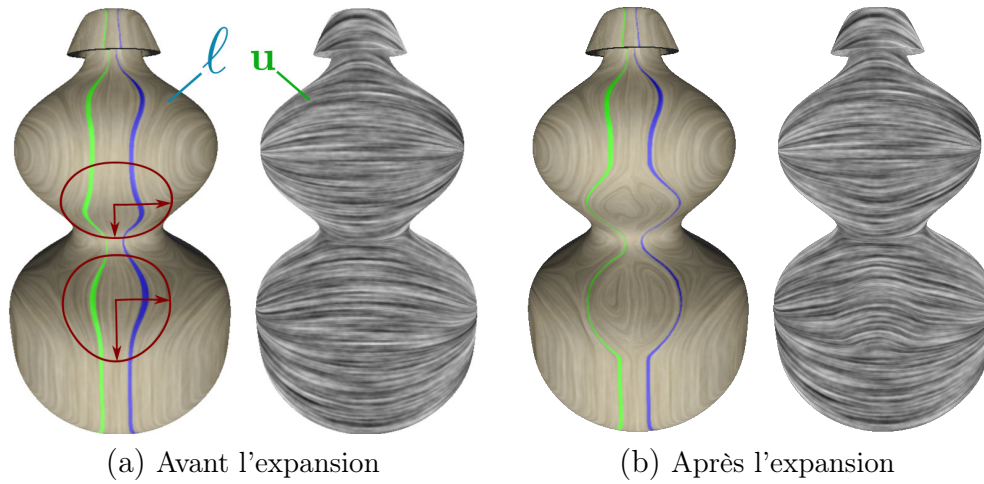


FIGURE 4.8 – (a) Ici, deux reflets sont déformés en même temps à l'aide de l'outil `expand`, qui (b) modifie leur trajectoire.

approche inverse alors que la méthode de Ritschel est un post-traitement appliqué à la radiance sortante.

Outil d'édition de lumière Plutôt que de manipuler \mathbf{u} à partir d'une source de lumière de référence fixée, l'outil `light` fait l'inverse. A partir d'un champ de direction fixé, il permet de trouver une direction de lumière qui aurait pu produire la tangente spéculaire donnée. En pratique, l'utilisateur dessine ce vecteur au sommet i , permettant d'obtenir la valeur ℓ_i qui sera utilisée pour récupérer ω_{in} en deux étapes. D'abord, la section 4.1.1 montre que \mathbf{h} doit être

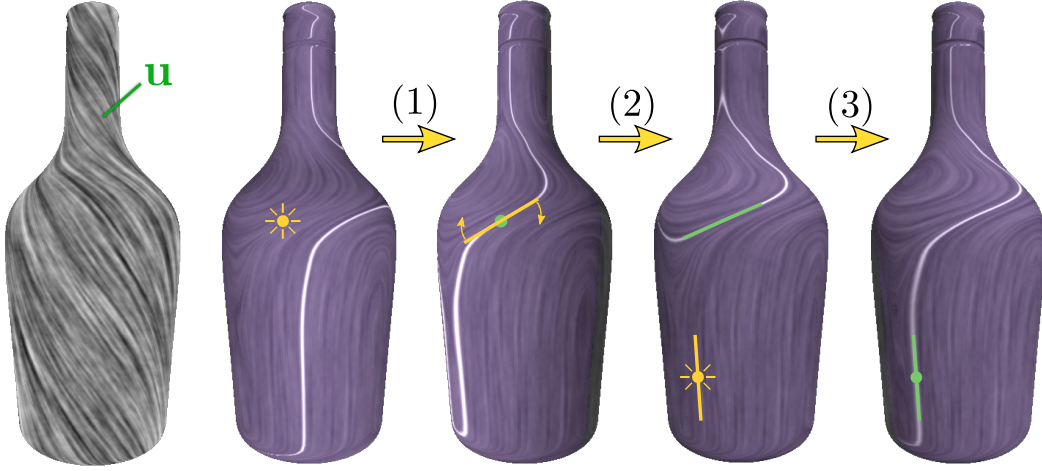


FIGURE 4.9 – En partant d’une direction existante \mathbf{u} , l’outil `light` permet de retrouver une direction de lumière : 1) en choisissant un point à travers lequel le reflet devra passer (en préservant ℓ) ; 2) en spécifiant ℓ localement ; 3) en dessinant un segment à travers lequel le reflet devra passer (1) et 2) cumulés).

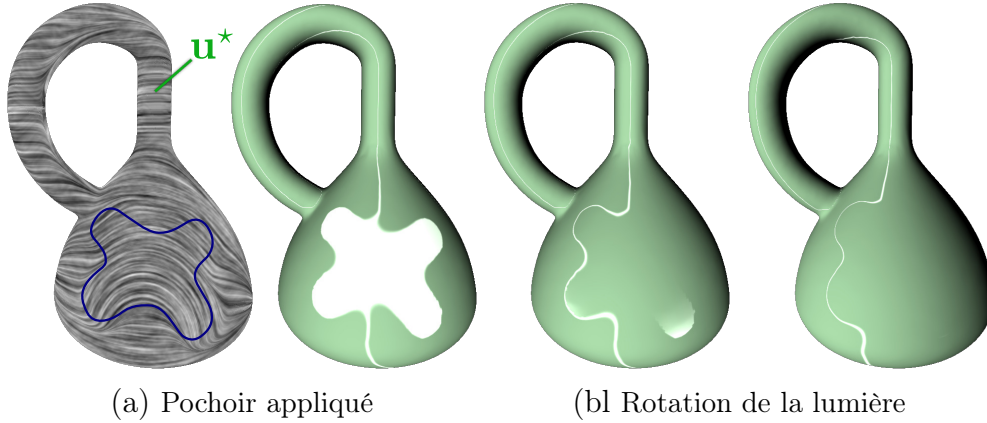


FIGURE 4.10 – (a) L’outil `stencil` permet de créer une région de reflets en utilisant un champ de direction spécifique \mathbf{u}^* ; (b) le résultat est très sensible aux variations de lumière et de point de vue.

dans le plan perpendiculaire à \mathbf{u}_i , ce qui permet de réduire les directions candidates à un sous-ensemble 1D des \mathbf{h} paramétrisés par θ_h . Seules les directions qui permettent d’illuminer un minimum (nous avons choisi $\epsilon = \pi/8$) le sommet i choisi sont conservées ($\mathbf{n}_i^T \omega_{in} > \epsilon$). Ensuite, à l’aide d’une recherche exhaustive, nous choisissons le θ_h qui entraîne la tangente spéculaire la plus proche de la cible selon l’équation 4.10. L’outil peut être utilisé de plusieurs façons, comme le montre la figure 4.9.

Outil pochoir. Nous avons également ajouté un outil `stencil` pour créer des régions de reflets comme dans la section 4.1.1. L'idée est de fixer directement les directions $\mathbf{u}_i^* = \pm \mathbf{h} \times \mathbf{n}_i$ des points compris dans le support de la brosse. Pour éviter la création d'arêtes vives, nous avons adouci \mathbf{u}_i^* en utilisant une régularisation Laplacienne comme dans l'optimisation de la section 4.2.3. Comme le montre la figure 4.10, les reflets obtenus peuvent prendre toutes les formes possibles, tout en restant très sensibles aux changements de lumière ou de point de vue. Ils redeviennent des courbes piégées dans les fortes courbures du champ d'orientation aux frontières de la région.

4.4 Performances et résultats additionnels

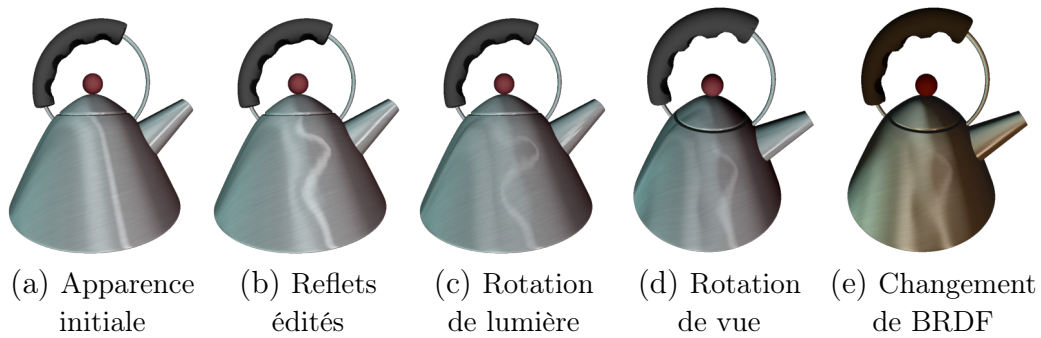



FIGURE 4.11 – (a) L'utilisation d'une BRDF anisotrope [AS00] produira des reflets étirés. (b) La méthode permet de trouver les orientations de BRDF appropriées pour donner l'illusion de la modification directe de la forme des reflets. (c-d) Les reflets édités conservent leurs déformations lors de faibles variations de lumière et de point de vue. (e) La forme du reflet est conservée même lorsque le matériau est modifié.

Pour tous les résultats, le solveur permet d'avoir un taux de rafraîchissement interactif sur un CPU Intel I7-3820 3.6GHz, en utilisant un seul coeur. Le temps de calcul augmente linéairement avec le nombre d'itérations; pour chaque itération, les temps dépendent du nombre de sommets édités comme le détaille la figure 4.12 (a). La vitesse nous semble suffisante pour l'édition même si les performances pourraient être optimisées en parallélisant la minimisation, en utilisant par exemple le langage dédié Opt [DMZ⁺16].

Un problème commun de l'optimisation non-linéaire est qu'il est possible de tomber dans un minimum local comme le montre la figure 4.12 (b). Lorsque ce problème arrive, l'optimisation est relancée avec des cibles légèrement différentes.

# Sommets	Jacobien	Solveur	Total	
14	0.6	0.8	1.4	
32	1.4	0.4	1.8	
89	3.0	2.7	5.7	
217	3.9	23.4	27.3	
420	9.5	55.2	64.7	
656	14.2	120.5	134.7	

(a) Temps (ms)

(b) Cas d'échec

FIGURE 4.12 – (a) Les temps sont donnés par itération, avec le détail de la construction de la matrice Jacobienne et de la résolution à proprement parler. (b) Un cas d'échec qui montre le solveur coincé dans un minimum local (haut : initial; bas : résultat).

Même si la boîte à outil est limitée, notre approche basée sur une optimisation permet aux utilisateurs de contrôler naturellement la forme des reflets. Un résultat est montré dans la figure 4.11, où notre méthode est appliquée à des objets familiers dans des configurations de vues et de lumières différentes. En comparaison, la manipulation directe des orientations de BRDF est contre-intuitive. La figure 4.13 montre notre approche sur un objet plus complexe en faisant varier la BRDF anisotrope. Comme l'optimisation utilise seulement les orientations de BRDF, elle est valide pour différents types de matériaux, à l'exception prévisible du velours. Étant donné qu'elle est basée sur les reflets anisotropes potentiels, la méthode fonctionne aussi avec les scènes en éclairage global comme le montre la figure 4.14.

4.5 Discussions

4.5.1 Éviter les singularités

Une limitation importante de la méthode est le fait que la courbe de reflet anisotrope doit passer par les singularités décrites dans la section 4.1. Ces singularités correspondent aux cas où $\mathbf{h} = \mathbf{n}$. Elles ne peuvent pas être contournées en modifiant seulement les orientations de BRDF. Ajouter un degré de liberté supplémentaire à l'optimisation serait un axe de recherche intéressant pour permettre de les éviter.

Changer la BRDF La position de la réflexion isotrope vient de l'orientation de la distribution des micro-facettes, qui est majoritairement dirigée vers la normale de la surface. Si nous modifions la BRDF afin que la distribution des micro-facettes soit orientée vers une autre direction, il deviendrait possible de modifier la position de la singularité. Pour permettre de conserver l'approche

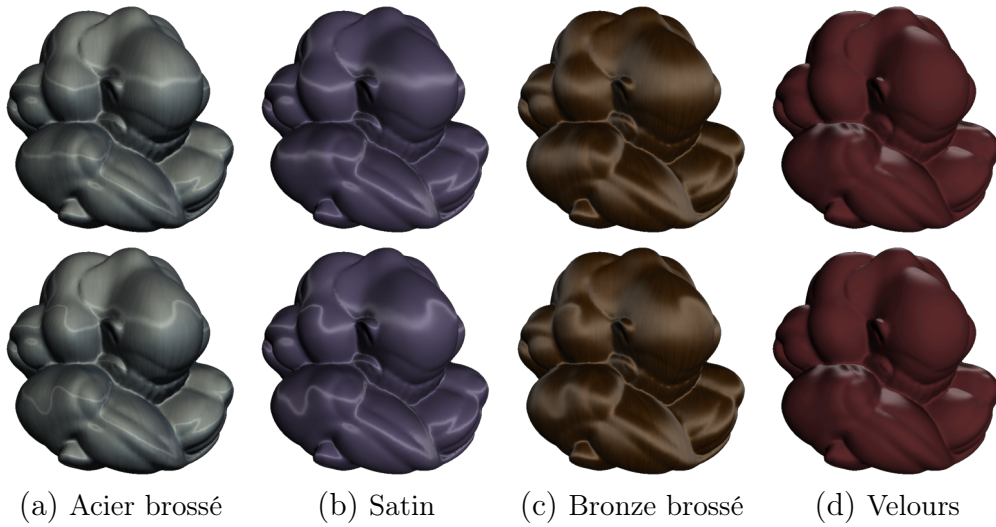


FIGURE 4.13 – Ligne supérieure : un modèle de statue utilisant un simple champ de direction initial, éclairé avec une seule lumière directionnelle et rendu avec quatre matériaux différents. Ligne inférieure : le modèle et les matériaux sont les mêmes mais le champ de direction a été *édité*. La forme des reflets est préservée lorsque le matériau change, sauf pour le velours où l'édition est à peine visible (sur les contours de la région éditée).

inverse de la méthode, il faudrait alors intégrer l'édition de la BRDF dans l'optimisation, ce qui entraînerait plusieurs conséquences. Tout d'abord, le choix de la BRDF ne serait plus libre et certains de ses paramètres ne pourraient plus changer sans modifier la trajectoire de la courbe. Ensuite, il ne serait pas garanti que la BRDF obtenue avec l'édition soit toujours physiquement plausible. Enfin, s'il y a plusieurs singularités, l'édition de la BRDF ne permettrait pas de toutes les contrôler en même temps. Il faudrait alors avoir recours à une SV-BRDF pour pouvoir la modifier localement.

Changer la normale Une autre option consiste à modifier localement la normale géométrique à la surface. Nous perdriions alors le réalisme de la technique puisque la normale ne correspondrait plus à la description de la véritable surface sous-jacente. Néanmoins, cette approche semble plus facile à réaliser car elle n'implique pas de connaître la BRDF et repose sur le rapport simple entre la normale et la direction de réflexion. De la même façon que le champ de tangentes, le champ de normales serait alors impliqué dans l'optimisation et son temps de calcul augmenterait également.

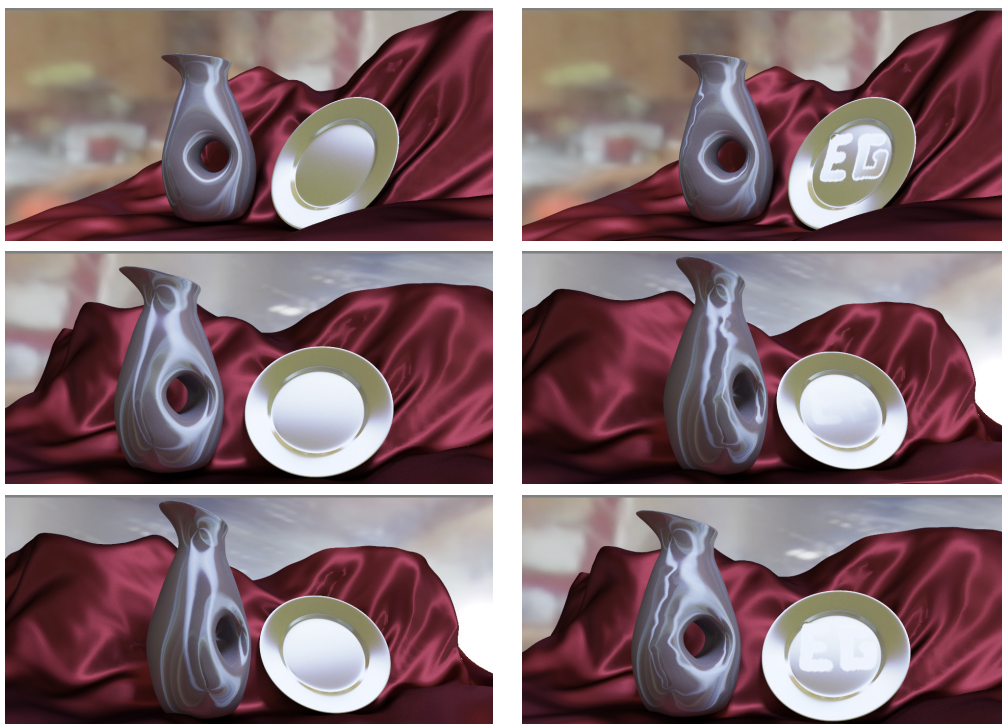


FIGURE 4.14 – Une scène rendue en illumination globale, composée d’un drapé de satin [APS00], une assiette en bronze clair [AS00], et un vase en métal [War92]. Colonne de gauche : trois différents points de vue et champ de direction simple. Colonne de droite : la même scène avec des champs de directions édités. L’outil `light` a été utilisé pour sélectionner les lumières clés, l’outil `warp` est appliqué sur le vase et aussi plus légèrement sur le drapé de satin, et l’outil `stencil` est utilisé sur l’assiette.

4.5.2 Création d’un outil de dessin direct du reflet

L’outil pochoir permet de créer des reflets anisotropes n’importe où, mais ils sont instables au changement de vue et de lumière. Il est basé sur la connaissance de l’orientation de la BRDF nécessaire pour produire l’apparition d’un reflet. D’autre part, l’outil déformation se base sur la connaissance des variations du champ d’orientation de la BRDF nécessaire pour orienter la courbe anisotrope. En mélangeant ces deux techniques, il pourrait être possible de maîtriser à la fois la position d’une courbe mais aussi sa direction. Il serait alors envisageable de créer un outil de dessin direct de courbe du reflet anisotrope, stable aux changements de vue et de lumière. En plus de la nécessité de mieux comprendre les reflets anisotropes, la mise au point de cet outil pose des problématiques que nous abordons dans cette section comme piste de recherche.

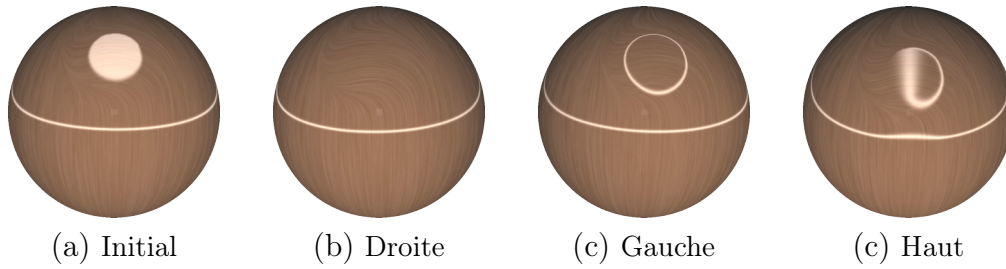


FIGURE 4.15 – (a) A partir du reflet initial créé à l'aide de l'outil pochoir, (b) changer la direction du point de vue dans une direction (ici vers la droite) fera disparaître le reflet tandis que (c) aller dans la direction opposée (ici vers la gauche) produira un reflet circulaire autour du reflet créé précédemment. (d) Les autres directions provoquent un reflet mélangeant les deux résultats.

Nous avons pu observer une piste possible pour la création de cet outil lors de l'utilisation de l'outil pochoir (voir figure 4.15). La surface de reflet créée est très instable lorsque le point de vue ou la direction de lumière change mais suivant la direction choisie, l'évolution du reflet sera différente. Dans le cas simple d'une sphère, nous avons pu caractériser deux évolutions distinctes du reflet qui se produisent chacune dans deux directions principales opposées l'une à l'autre. Dans la première direction principale, le reflet va simplement disparaître tandis que dans la direction opposée, une courbe anisotrope circulaire relativement stable se créera autour de l'emplacement du reflet qui était dessiné par l'utilisateur. Dans les autres directions, le reflet adopte un comportement au croisement des deux précédents. Dans les deux derniers cas, nous avons donc observé qu'une courbe anisotrope a pu être créée à partir de rien.

Les observations que nous avons faites nous renseignent sur la création stable d'un reflet. L'utilisation de l'outil pochoir produit une importante déformation du champ d'orientation. Nous avons vu dans la section 4.3 que l'outil pochoir est accompagné d'une minimisation Laplacienne qui est effectuée à la périphérie de la zone d'édition. Ce lissage permet de créer une zone de forte courbure du champ d'orientation à la frontière du reflet nouvellement créé. C'est cette courbure qui nous intéresse car c'est elle qui *piège* les reflets anisotropes. La conception d'un outil de dessin direct viserait à créer une ligne de forte courbure centrée sur l'orientation qui provoque la réflexion anisotrope souhaitée. Il faudrait également prévoir des singularités dans le champ pour contrôler précisément le début et la fin des courbes de reflets anisotropes. De manière plus générale, il faudrait trouver une méthode d'optimisation globale des champs de vecteurs permettant d'inférer ces contraintes [VCD⁺16].

Chapitre 5

Perspectives

En plus des différentes discussions et perspectives de recherche que nous avons développées dans chacune des conclusions des deux chapitres précédents, nous proposons ici des perspectives de recherche basées sur les problématiques plus générales de la manipulation de l'apparence de reflets anisotropes.

5.1 Lien entre l'apparence et la géométrie

D'une part la compréhension du lien entre l'orientation de la BRDF anisotrope et l'apparence des reflets a rendu possible de proposer un outil d'édition des reflets directement sur les objets. D'autre part, une approche numérique de représentation de l'apparence nous a permis de caractériser la BRDF correspondant à un profil de rayure. Néanmoins une étude encore plus approfondie du lien qui unit géométrie et apparence apporterait de nouvelles applications et des améliorations de performance. Cette section discute des outils de compréhension ainsi que des applications qui pourraient émerger d'une telle méthode.

5.1.1 Intuitions sur l'image de la BRDF d'une rayure simple

La figure 5.1 présente le comportement de la BRDF sur un profil en V lorsque la profondeur change. Les couleurs des pixels correspondent au nombre de rebonds que le rayon a subi avant de ressortir de la rayure. Les pixels rouges correspondent à 1 rebond, 2 pour les verts, 3 pour les bleus et 4 pour les jaunes.

Nos images de BRDF reposent sur la paramétrisation présentée dans la section 3.2. Pour une direction de lumière donnée, le premier rebond sur un profil en V a seulement deux résultats possibles : il correspond soit à la réflexion sur le premier versant, soit sur le second. Dans notre paramétrisation, cela se traduit par l'apparition de deux pics de Dirac sur chacune des colonnes

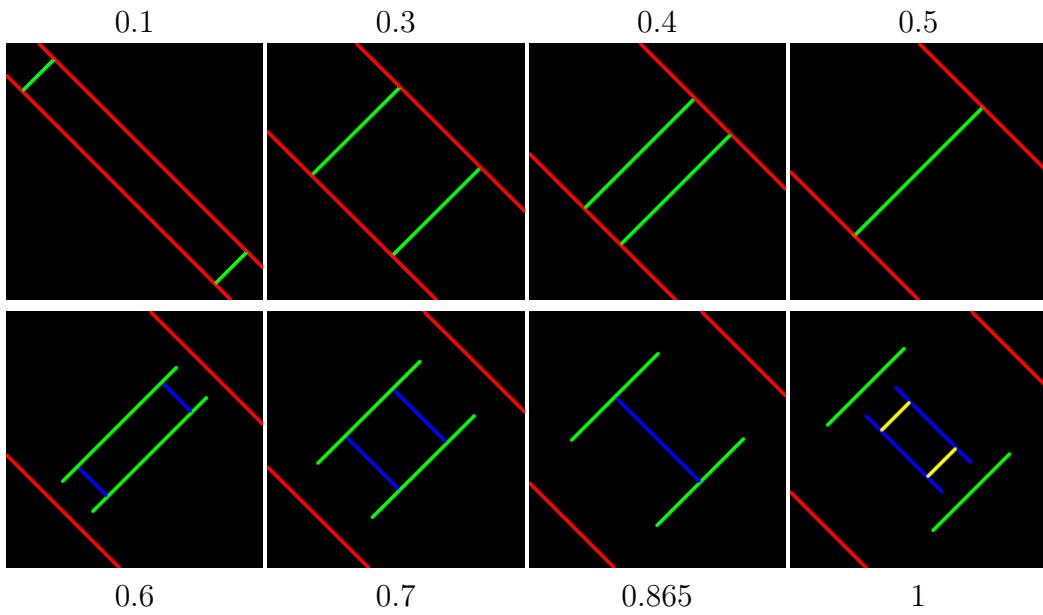


FIGURE 5.1 – Pendant que les deux lignes rouges (0.1) du premier rebond s'écartent (0.3) de la réflexion miroir, les lignes vertes du deuxième rebond se rapprochent (0.4) jusqu'à se superposer dans la diagonale de la rétro-réflexion (0.5). Une fois qu'elles se sont croisées, la séparation cause l'apparition d'un troisième rebond en bleu (0.6) qui suit le même comportement que le second rebond (0.7). Les lignes de ce rebond impair se croisent sur l'axe de la réflexion miroir cette fois-ci (0.865) et créent à leur tour le quatrième rebond sur la diagonale de rétro-réflexion (1).

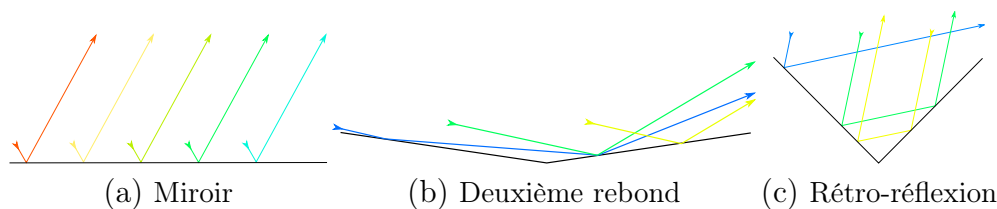


FIGURE 5.2 – (a) Lorsque la profondeur est à 0, les deux versants du profil réagissent de la même façon pour former un miroir plan. (b) Dès que la rayure s’approfondit et que l’angle du rayon est rasant, il est possible qu’il nécessite deux rebonds pour ressortir. (c) Dans le cas exact d’un profil V à angle droit, la direction d’entrée et de sortie de la rayure est la même pour les rayons effectuant deux rebonds.

(ou chacune des lignes puisque la BRDF est réciproque). Les lignes rouges représentent l’évolution de ces deux pics de Dirac le long des directions de vue et de lumière. Leurs variations provoquent l’apparition de *segments*, primitives atomiques du profil en V sur l’image de la BRDF.

Lorsque la rayure est parfaitement plane, la surface est complètement miroir et les segments rouges correspondant au premier rebond se superposent sur la diagonale représentant la réflexion miroir classique (voir figure 5.2 (a)). Dès que la profondeur augmente, les segments rouges s’écartent de la réflexion miroir. Aux angles rasants, certains rayons peuvent déjà nécessiter deux rebonds pour ressortir de la rayure (voir figure 5.2 (b)). Ces seconds rebonds correspondent à l’apparition des segments verts perpendiculaires aux rouges dans l’image de la BRDF. Lorsque la rayure s’approfondit (5.1 (0.3)), les segments rouges s’écartent encore mais les segments verts grandissent et se rapprochent vers le centre de la BRDF (5.1 (0.4)) jusqu’à se rejoindre (5.1 (0.5)). Dans cette configuration particulière, les rayons qui rebondissent deux fois ressortent tous dans la même direction et maximisent la rétro-réflexion (voir figure 5.2 (c)). Après s’être croisés sur la diagonale de rétro-réflexion, les segments verts s’écartent tandis que des segments bleus correspondant au troisième rebond apparaissent perpendiculairement (5.1 (0.6)). Le comportement est alors le même que pour le deuxième rebond, les segments se rapprochent (5.1 (0.7)), se croisent (5.1 (0.865)) puis s’écartent pour laisser apparaître le quatrième rebond en jaune (5.1 (1)).

Il devient alors possible de constater des propriétés ainsi que des comportements réguliers des primitives :

- Les segments de rebonds supérieurs sont plus petits que les rebonds précédents.
- Les rebonds sont séparables selon leur parité : les segments créés à

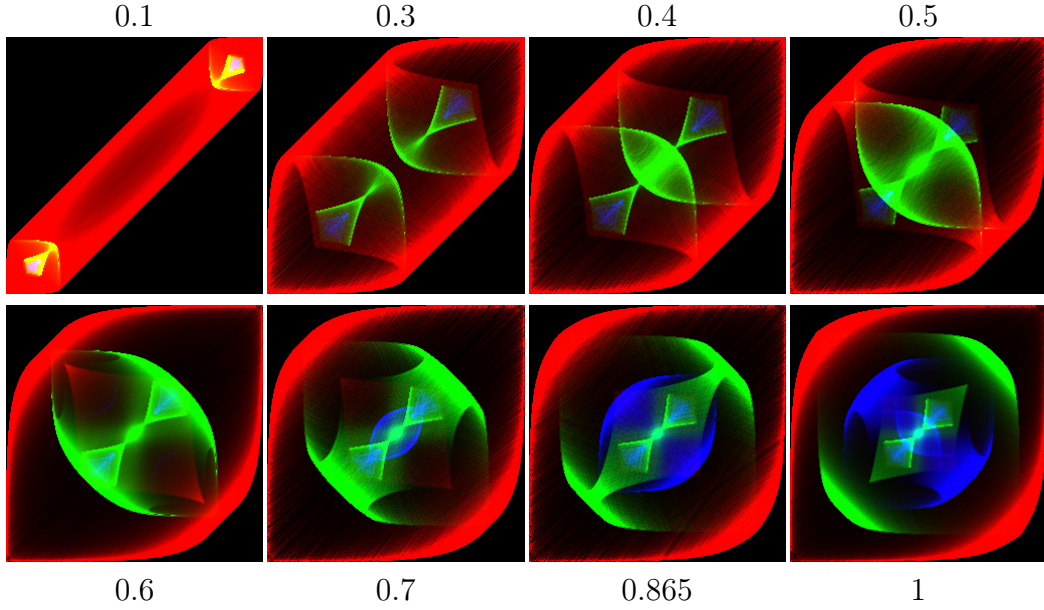


FIGURE 5.3 – L'évolution de la BRDF dans le cas d'un profil basé sur une fonction quartique est moins simple à caractériser que dans le cas des rayures en V. Néanmoins, il est possible de retrouver des similitudes dans le comportement des primitives. Attention, ici le jaune est le résultat de l'addition du rouge et du vert, il ne représente pas un quatrième rebond.

partir d'un nombre de rebonds impair seront parallèles à la diagonale de réflexion miroir tandis que les segments des rebonds pairs seront parallèles à la diagonale de rétro-réflexion.

- Sauf pour le premier rebond, les segments des rebonds apparaissent pour les angles rasants, grandissent et se rapprochent jusqu'à se croiser au centre puis s'écartent de nouveau.
- Le premier rebond suit le même comportement que les autres mais il ne commence pas au même angle. Cette avance peut s'expliquer par le fait que les rayons qui causent des rebonds d'ordres supérieurs peuvent venir d'une direction qui est dans l'hémisphère inférieure de la surface. Autrement dit, après avoir rebondi dans la rayure, certains rayons peuvent aller vers le haut sans pour autant sortir directement de la rayure [HJEC16].

5.1.2 Profils plus complexes

La figure 5.3 présente le comportement de la BRDF sur un profil quartique lorsque la profondeur change. Comme lors de l'observation de la BRDF des rayures en V, les couleurs correspondent au nombre de rebonds. Cette fois-ci, les rebonds d'ordre supérieur à 3 sont tous bleus.

Bien que l'image soit plus complexe, l'étude du profil en V nous a permis de mieux cerner le comportement de la BRDF avec une rayure possédant ce profil. Il est toujours possible de discerner des "primitives" même si leurs formes sont cette fois-ci bien plus complexes qu'un segment. La primitive du premier rebond prend la forme d'un "front d'onde" suivi d'un voile (5.3 (0.1)). Le comportement des primitives lorsque la profondeur augmente reste le même : avec un rapprochement, un croisement puis une séparation. Les primitives du second rebond ont une forme différente (5.3 (0.3)) de celles du premier jusqu'au moment où elles se croisent (5.3 (0.5)). Le reste de l'évolution est semblable à celui du profil en V .

Après les quelques profils que nous avons testés, nous avons observé que la BRDF d'une rayure semble pouvoir être séparée en primitives dont la forme dépend du profil utilisé. Si la rayure n'est pas symétrique, les formes des deux primitives obtenues pour chaque versant du rebond ne seront pas similaires (voir figure 3.5 bas). Lorsque la profondeur du profil change, ces primitives se créent, se déplacent et changent de taille de manière potentiellement prévisible.

5.1.3 Édition dans l'espace de la BRDF

Comme chaque édition sur l'image de la BRDF entraîne une modification de l'apparence, elle pourrait être utilisée comme support d'édition. L'approche la plus naïve consisterait à donner à l'utilisateur des outils classiques d'édition d'image comme des brosses et des pinceaux pour qu'il puisse ajouter ou enlever des lobes à la BRDF. L'inconvénient de cette approche est que l'utilisateur pourrait très vite rendre la BRDF physiquement non plausible et que la BRDF ne serait plus liée à une véritable micro-géométrie.

Il est possible d'ajouter des contraintes à l'édition pour conserver le réalisme physique de la BRDF. Conserver la symétrie par rapport à l'axe diagonal permet d'assurer la réciprocité tandis que conserver la symétrie par rapport à l'anti-diagonale permet de caractériser l'apparence d'une rayure symétrique. Il est possible de garantir la conservation d'énergie en s'assurant que la somme des intensités de chaque ligne ou de chaque colonne soit inférieure ou égale à $\cos(\phi)$. Cette contrainte semble toutefois plus difficile à mettre en place dans le cadre d'une interaction utilisateur. L'édition pourrait se faire à angle rasant pour que l'utilisateur n'ait pas à considérer l'effet de Fresnel. Il faudrait cependant réussir à répercuter l'effet de Fresnel dans les deux autres canaux ou au moins l'approcher. Bien que l'ajout de contraintes permette d'apporter des garanties sur la BRDF résultante, ces méthodes d'édition ne garantissent pas qu'un profil correspondant existe.

Il est aussi envisageable de laisser un contrôle plus haut niveau à l'utilisateur. A partir d'un profil et d'une profondeur initiale, notre simulation pourrait créer une première version de la BRDF. En isolant les primitives, il pourrait alors être possible de les transformer directement dans notre paramétrisation de la BRDF en fonction de la profondeur. La transformation des primitives pourrait n'être qu'une approximation mais le fait d'opérer la transformation directement dans l'image permettrait de ne pas avoir à refaire une simulation complète. La possibilité de prévoir le comportement d'une primitive lorsque la profondeur de la rayure change permettrait alors de modifier la BRDF procéduralement. La difficulté résiderait dans la prédiction du comportement des primitives dans notre paramétrisation mais également dans l'espace de la CDF inverse.

5.1.4 Approche analytique

Bien que la réduction de dimension de la BRDF nous permette d'obtenir un modèle relativement léger pour représenter l'apparence des rayures, la nécessité de passer par des données peut aussi être une limitation. Une hypothèse faite pour notre modèle consiste à considérer que toutes les rayures sur la surface sont les mêmes, au ratio d'aspect près. Pour passer outre cette limitation, il est possible d'utiliser plusieurs couches de rayures avec des BRDF différentes. Cette solution fonctionne pour augmenter la diversité de l'apparence mais elle devient trop coûteuse pour attribuer une BRDF différente à chaque rayure. Une meilleure compréhension du lien entre la géométrie de la rayure et la BRDF ainsi que de nouvelles hypothèses pourraient permettre de créer un modèle analytique de BRDF pour les rayures. Il faudrait alors seulement stocker les paramètres des profils de chacune des rayures et la BRDF serait évaluée lors du rendu. Ce modèle se rapprocherait alors des modèles basés primitives présentés dans l'état de l'art (section 2.2).

Dans le cas limite où la vue est suffisamment proche pour que l'utilisation de la BRDF puisse rester correcte, nous avons vu dans la section 3.5.2 qu'une solution serait d'avoir un modèle le rapprochant d'une BTF. Or, même s'il était plus léger en mémoire que les BTF classiques, l'hypothétique modèle de BTF présenté en nécessiterait toujours beaucoup. De la même manière que pour une BRDF analytique, une extension intéressante de notre méthode serait de le compléter par un modèle analytique de BTF.

5.1.5 Réutilisation de l'approche

Approche basée primitives L'approche basée sur les primitives permet d'isoler le comportement d'une primitive qui va se répéter sur une surface.

Il est donc intéressant de l'utiliser sur des matériaux dont la micro-surface est structurée, comme dans le cas des rayures. D'une part, quelques hypothèses sur les rayures permettent de contraindre le problème à 2 dimensions. D'autre part, les rayures provoquent des reflets anisotropes qui ont, sans paramétrisations appropriées, un comportement difficile et coûteux à représenter.

L'observation des *hémisphériques pits* [PK02] propose déjà un aperçu du comportement dans des trous hémisphériques pouvant par exemple représenter la surface recouverte de cratères de la lune. De la même manière, avec notre méthode, un modèle de BRDF de cratère pourrait alors émerger. L'approche basée primitives a déjà été utilisée pour le cas plus complexe des tissus [IM12]. La différence entre ces techniques et la nôtre se fait dans le traitement de la primitive. Dans les méthodes précédentes, le procédé était analytique tandis que la nôtre, basée sur la simulation, est numérique.

Approche basée primitive numérique La simulation du transport lumineux dans la rayure permet de trouver la BRDF quel que soit le profil de la rayure et donc quelle que soit sa géométrie. Elle permet ainsi de réduire les hypothèses faites sur la primitive pour obtenir le modèle correspondant. Cette différence est avantageuse en comparaison de l'approche analytique où les primitives sont des objets géométriques simplifiés pour le calcul. Dans le cas des tissus, les fibres pourraient alors être représentées par des formes plus complexes que des cylindres et le transport lumineux à l'intérieur des fibres pourrait être simulé pour améliorer le réalisme.

Gonio-réfectomètre virtuel L'utilisation de la simulation en dehors du cas des primitives est également un champ de recherche prometteur. La création et la validation d'un gonio-réfectomètre virtuel serait la première étape pour parvenir à un outil générique de capture de matériaux virtuels plus performant et moins contraignant que les gonio-réfectomètres physiques. Enfin, la simulation virtuelle du transport lumineux permettrait de quantifier les effets des approximations faites par les modèles de matériaux actuels sur l'apparence des matériaux. Il serait par exemple possible de comparer l'importance des inter-réflexions sur l'apparence finale.

L'utilisation d'un tel outil pour la comparaison serait une approche plus intéressante que celle de la photographie. La différence pourrait alors se faire seulement dans la façon de représenter le matériau lui-même, qui dans le cas du gonio-réfectomètre virtuel serait basé sur un champ de hauteur mesuré à partir d'un échantillon servant de surface de comparaison (voir figure 3.22). Les paramètres d'éclairage et de prise de vue pourraient être partagés entre les deux modèles pour les comparer dans des conditions véritablement similaires. Ainsi, il serait également plus simple de faire varier la direction de vue et les conditions d'éclairage. En plus de servir de vérité terrain, le gonio-réfectomètre

virtuel permettrait d'être configuré pour éliminer des éléments de l'apparence comme les ombres et les inter-réflexions afin de pouvoir caractériser les domaines dans lesquels notre modèle pourrait être le moins performant.

5.1.6 Extension de l'outil d'édition de l'apparence

Notre modèle d'édition des reflets anisotropes utilise actuellement l'orientation de la BRDF comme degré de liberté. Il permet de modifier localement la trajectoire de la courbe anisotrope, mais pas de changer l'intensité du reflet sur la courbe. Notre modèle de BRDF permet également de faire varier l'intensité des reflets mais son seul moyen de contrôle est le profil de rayure donné par l'utilisateur. Nous pouvons imaginer un modèle d'édition étendu mélangeant les deux méthodes, à ce moment il deviendrait possible de conserver l'approche inverse en incorporant le profil de rayure comme nouveau degré de liberté. La minimisation serait alors plus compliquée à mettre en place mais il pourrait y avoir un meilleur contrôle sur les reflets. Par exemple, cette solution permettrait de ne pas tenir compte des singularités par lesquelles la courbe de reflet spéculaire doit absolument passer, comme décrit dans la section 4.4.

5.2 Hypothèses multi-échelles

Nos contributions s'appuient sur des hypothèses et des approximations classiquement faites dans la littérature. Lors d'une approche multi-échelles et dans des configurations particulières, ces approximations peuvent entraîner une imprecision de l'apparence sur la vérité terrain. Dans cette section, nous allons résumer ces hypothèses, évaluer leur validité dans nos contributions et en déduire des perspectives de recherche.

5.2.1 Courbures de la surface

Comme la BRDF telle qu'elle est définie par Nicodemus [Nic65] représente la réflectance sur une surface d'aire infinitésimale, la courbure de la surface ne rentre pas en compte. Cette hypothèse reste une bonne approximation pour les modèles basés sur la théorie des micro-facettes. En effet, les inter-réflexions ne sont pas prises en compte et l'aire de la surface d'évaluation de la distribution des micro-facettes tend vers 0. Or, nous pouvons nous poser la question de savoir si cette hypothèse reste valide avec l'utilisation des BRDF multi-échelles où l'aire d'évaluation de la BRDF ne tend pas vers zéro et change en fonction de la distance de point de vue.

Prendre en compte les inter-réflexions dans la micro-surface au sein de la BRDF revient à rendre possible les cas où la position du rayon incident est

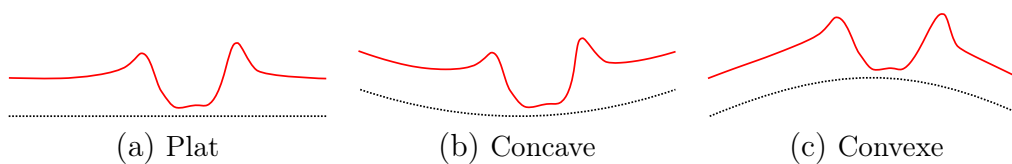


FIGURE 5.4 – Nous avons traité le cas où (a) la rayure est sur une surface localement plane. Dans le cas extrême où la largeur de la rayure est du même ordre de grandeur que la courbure, cette dernière peut avoir une influence sur la BRDF. Le profil de la rayure varie en fonction de la courbure. Lorsque la courbure provoque (b) une concavité, l’hypothèse du rayon piégé dans la rayure est toujours valide tandis que lorsque le profil est convexe, une erreur peut être produite par des rayons ressortant prématurément.

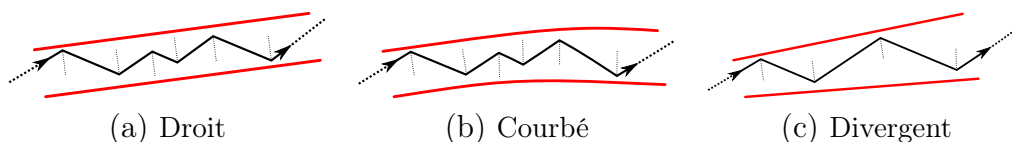


FIGURE 5.5 – Pour une même direction d’entrée, (a) la direction de sortie du rayon peut varier en fonction (b) de la courbure de la rayure mais aussi (c) si la largeur de la rayure varie.

différente de la position du rayon sortant. Pour qu’il y ait conservation d’énergie dans la BRDF, ces deux positions doivent alors être comprises dans son aire d’évaluation. La distance entre les deux points augmente l’aire d’évaluation de la BRDF et renforce l’importance de la courbure sur l’apparence finale. Dans notre modèle de SV-BRDF de rayure, une forte courbure peut avoir une incidence dans deux cas précis.

Courbure le long de \mathbf{u} Suivant la rayure et l’angle d’incidence $\phi_{\omega_{out}}$, il est possible que le rayon rebondisse de nombreuses fois dans la rayure. Lorsque la direction de vue devient rasante, l’angle d’élévation $\theta_{\omega_{out}}$ de la direction de vue tend vers $\frac{\pi}{2}$. A chaque rebond, le rayon parcourt alors une distance relativement importante dans la rayure considérée plate. Or, plus la distance parcourue est grande, plus la courbure le long de la rayure sera importante à prendre en compte pour l’apparence finale.

La courbure le long de \mathbf{v} est négligeable car la largeur de la rayure est plus petite que l’empreinte d’un pixel dans notre méthode.

5.2.2 Courbure géodésique et divergence des rayures

De la même manière que nous avons considéré la surface localement plate, nous avons fait l’hypothèse que les rayures d’une couche étaient localement rectilignes et parallèles entre elles. Exactement comme pour la courbure de

la surface, cette hypothèse entraîne une approximation qui aura un impact négligeable sur l'apparence la plupart du temps. Néanmoins, il existe ici aussi des cas très particuliers d'utilisation du modèle où cette hypothèse pourrait entraîner une erreur.

Rotationnel Comme la direction des rayures est représentée par le champ des orientations sur la surface, le rotationnel du champ représente la courbure géodésique des rayures. Nous avons considéré dans notre modèle de SV-BRDF que les rayures étaient rectilignes pour s'assurer que les rayons de sortie de la rayure restent dans le cône de réflexion. Dans l'approche multi-échelles, la courbure locale de la rayure dépend alors du rotationnel mais aussi de l'aire de la surface d'intégration de la BRDF. Autrement dit, si le rotationnel est important par rapport à l'empreinte de la BRDF, les rayures sont localement courbées et la réflexion ne se fait plus seulement sur le cône.

Divergence des rayures Bien que nous ayons considéré les rayures comme étant localement parallèles, la paramétrisation de l'objet et son champ d'orientation associé peut créer des zones à la surface où la divergence n'est pas nulle. Là encore, si cette divergence est négligeable par rapport à l'aire d'évaluation de la BRDF, l'hypothèse reste valable. Dans le cas contraire, la divergence locale se répercute sur la forme de la rayure. Si le champ converge, la largeur de la rayure va diminuer tandis que s'il dit verge, la largeur de la rayure augmente. Bien que ce comportement n'entraîne pas la modification du profil de rayure pour la simulation dont seul le ratio d'aspect compte, la divergence locale implique un léger biais sur l'hypothèse selon laquelle les rayures sont droites.

Il serait intéressant d'évaluer l'impact de ces hypothèses sur la précision de notre modèle, notamment lorsque les rayures sont profondes et produisent beaucoup d'inter-réflexions.

5.2.3 Variations locales de la vue et de la lumière

Dans notre modèle de SV-BRDF, nous sommes partis des mêmes hypothèses que pour les modèles de BRDF. Les directions de vue et de lumière sont considérées constantes sur toute la surface de l'empreinte d'évaluation de la BRDF. De la même manière que pour la courbure, cette approximation peut être limitée lorsque la direction de vue ou de lumière est extrêmement rasante. Puisque notre modèle permet de gérer les inter-réflexions, il devient possible qu'une distance non négligeable soit parcourue par les rayons intégrés dans notre BRDF. Cette distance pourrait alors rendre la variation de direction de la vue et de la lumière non négligeable.

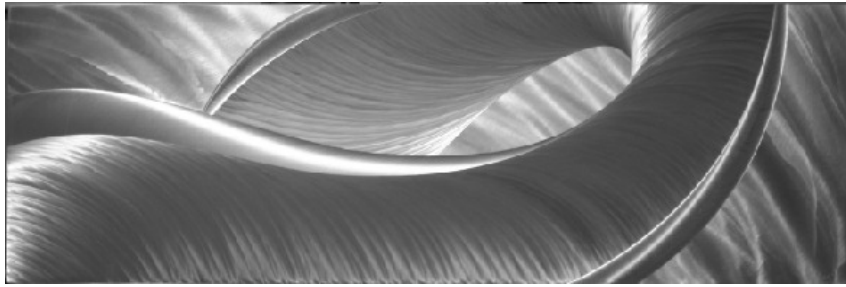


FIGURE 5.6 – Steve Prachyl est un artiste qui sculpte des plans de métal en les brossant. Les reflets anisotropes ainsi créés donnent une impression forte de 3D.

Dans notre outil d'édition des reflets, notre formule tiens compte de la position du point de vue et de la direction de lumière mais ne prend pas en compte leurs variations. La prise en compte d'un point de vue local permettrait également d'améliorer la précision de la technique, notamment dans le cas d'un objet plan, où actuellement elle ne peut fonctionner qu'avec une courbure géodésique ou une divergence minimale. L'utilisation d'un plan pour créer des reflets anisotropes complexes n'est pas un frein pour la richesse de l'apparence comme l'a montré Steve Prachyl [Pra16] avec ses sculptures brossées (voir figure 5.6).

5.3 Fabrication

Notre méthode d'édition des orientations de la BRDF permet d'obtenir un modèle physiquement réaliste de directions de micro-structures. Les objets que nous obtenons peuvent donc théoriquement être fabriqués. Cette fabrication justifierait une application intéressante à notre méthode et permettrait de la valider. Néanmoins, elle entraîne de nouvelles problématiques de recherche dont certaines ont été effleurées lors de la création du modèle de SV-BRDF.

Bien que la méthode d'édition des reflets produise un champ d'orientation de BRDF et donc un champ d'orientation de la micro-géométrie anisotrope, elle ne suffit pas à contraindre suffisamment le modèle pour qu'il soit imprimable. Nous avons vu dans notre modèle de SV-BRDF que cette micro-géométrie a un impact sur l'apparence finale de la courbe anisotrope. Comme pour le modèle de SV-BRDF de rayure, il serait alors possible de se servir d'un profil de rayure et de la description des motifs à la surface comme base de la micro-géométrie. La génération explicite de la géométrie que nous avons vue dans la section 3.5.2 permettrait alors à partir de ces paramètres de représenter un objet qui pourrait par la suite être créé.

La création de la surface implique des problématiques de recherche qui sont relativement éloignées de notre domaine. Néanmoins, les points suivants seraient importants à considérer pour obtenir une apparence fidèle à l'apparence voulue :

- La précision atteignable doit être suffisamment fine pour représenter correctement la micro-géométrie.
- Le matériau de la surface doit être suffisamment spéculaire. L'utilisation d'un métal semble un bon choix initial.
- Le processus de gravure ou d'impression doit maintenir une surface assez spéculaire pour que la courbe de reflet anisotrope puisse apparaître.
- Pour éviter d'avoir à gérer des largeurs de rayures variables partout sur la surface, la meilleure solution serait de créer un champ d'orientation qui minimise la divergence.

Chapitre 6

Conclusion

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressé aux liens qu'il existe entre la micro-géométrie et l'apparence. Nous avons pour cela concentré nos efforts sur le cas particulier des matériaux anisotropes.

Notre modèle de SV-BRDF de rayures s'appuie sur une paramétrisation particulière permettant de réduire la dimensionnalité de la BRDF et donc du problème. Nous avons créé un modèle physiquement plausible de BRDF hybride qui est une combinaison d'une composante analytique permettant de gérer la réduction de dimension et une composante simulée restituant finement l'apparence des rayures. Notre modèle de variations spatiales est basé sur la connaissance de la structure d'une rayure. Il permet de représenter les rayures avec une résolution beaucoup plus faible qu'une carte de normale en y ajoutant la gestion de l'ombrage, du masquage et des inter-réflexions. De plus, comme il est basé sur l'aire des rayures, il est facilement pré-filtrable. Nous avons montré que le modèle peut-être utilisé efficacement dans des scènes interactives mais qu'il est aussi utilisable dans le cas du rendu différé en éclairage global.

Notre outil d'édition des reflets anisotropes se base aussi sur le lien entre la micro-géométrie et l'apparence. Notre première contribution consiste à exprimer le rôle des différents éléments de la surface qui ont un impact sur la direction du reflet anisotrope. A partir de ces connaissances, notre outil modifie le champ d'orientation de la BRDF plutôt que la BRDF elle-même, autrement dit, il ne modifie pas le matériau mais la façon dont il est appliqué à la surface. Nous avons présenté une palette d'outils qui permettent d'éditer l'apparence des matériaux anisotropes de plusieurs manières, en proposant des déformations de reflets mais aussi du dessin direct de reflets et de l'édition de lumière. Nous avons montré que nos éditions sont physiquement plausibles et qu'elles restent cohérentes aux changements de point de vue et de lumière. Nous avons également montré la validité de l'édition dans le cas d'une scène en éclairage global.

Nous avons donc mis en évidence de nombreux liens intéressants de l'impact de la micro-géométrie sur l'apparence. Une perspective de recherche d'ordre plus général serait d'inverser ces liens. Autrement dit, il serait intéressant de trouver les contraintes qu'une apparence donnée pourrait avoir sur la micro-géométrie.

Bibliographie

- [Ade01] Edward H. Adelson. On Seeing Stuff : The Perception of Materials by Humans and Machines. In *Proceedings of the SPIE*, volume 4299, pages 1–12, 2001.
- [All] Allegorithmic. Substance Designer. <https://www.allegorithmic.com/products/substance-designer>.
- [APS00] Michael Ashikhmin, Simon Premože, and Peter Shirley. A microfacet-based BRDF generator. In *Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, SIGGRAPH '00, pages 65–74, New York, NY, USA, 2000. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [AS00] Michael Ashikhmin and Peter Shirley. An anisotropic phong brdf model. *J. Graph. Tools*, 5(2) :25–32, February 2000.
- [Aut] Autodesk. Maya. <http://www.autodesk.com/products/mudbox/overview>.
- [BAEDR08] Aner Ben-Artzi, Kevin Egan, Frédo Durand, and Ravi Ramamoorthi. A precomputed polynomial representation for interactive brdf editing with global illumination. *ACM Transactions on Graphics*, 27(2) :13 :1–13 :13, May 2008.
- [BAOR06] Aner Ben-Artzi, Ryan Overbeck, and Ravi Ramamoorthi. Real-time brdf editing in complex lighting. *ACM Transactions on Graphics*, 25(3) :945–954, July 2006.
- [BBGS08] Jerome Baril, Tamy Boubekeur, Patrick Gioia, and Christophe Schlick. Polynomial Wavelet Trees for Bidirectional Texture Functions. In *ACM Siggraph 2008 - Talk Program*, Los Angeles, United States, August 2008.
- [Bli77] James F. Blinn. Models of light reflection for computer synthesized pictures. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 11(2) :192–198, 1977.
- [BLNZ95] Richard H. Byrd, Peihuang Lu, Jorge Nocedal, and Ciyu Zhu. A limited memory algorithm for bound constrained optimization. *SIAM J. Sci. Comput.*, 16(5) :1190–1208, September 1995.

-
- [BN11] Eric Bruneton and Fabrice Neyret. A survey of non-linear pre-filtering methods for efficient and accurate surface shading. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2011.
 - [BNH10] Eric Bruneton, Fabrice Neyret, and Nicolas Holzschuch. Real-time realistic ocean lighting using seamless transitions from geometry to BRDF. *Computer Graphics Forum*, 29 :487–496, 2010.
 - [BPMG04] Carles Bosch, Xavier Pueyo, Stéphane Mérillou, and Djamchid Ghazanfarpour. A physically-based model for rendering realistic scratches. In *Computer Graphics Forum*, volume 23, pages 361–370, 2004.
 - [Bur12] Brent Burley. Physically-based shading at disney. *ACM SIGGRAPH Course*, pages 1–26, 2012.
 - [CDS10] Keenan Crane, Mathieu Desbrun, and Peter Schröder. Trivial connections on discrete surfaces. *Eurographics Symposium on Geometry Processing*, 29 :1525–1533, 2010.
 - [CL93] Brian Cabral and Leith Casey Leedom. Imaging vector fields using line integral convolution. *Proc. SIGGRAPH*, pages 263–270, 1993.
 - [CP03] F. Cazals and M. Pouget. Estimating differential quantities using polynomial fitting of osculating jets. In *Proceedings of the 2003 Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing*, SGP '03, pages 177–187. Eurographics Association, 2003.
 - [CPK06] Mark Colbert, Sumanta Pattanaik, and Jaroslav Křivánek. BRDF-Shop : Creating physically correct bidirectional reflectance distribution functions. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 26 :30–36, 2006.
 - [CT81] Robert L Cook and Kenneth E. Torrance. Computer Graphics Volume 15, Number 3 August 1981. *Computer*, 15(3) :307–316, 1981.
 - [dC76] Manfredo P. do Carmo. *Differential Geometry of Curves and Surfaces*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1976.
 - [DHI⁺13] Jonathan Dupuy, Eric Heitz, Jean-Claude Iehl, Pierre Poulin, Fabrice Neyret, and Victor Ostromoukhov. Linear efficient antialiased displacement and reflectance mapping. *SIGGRAPH*, 32 :1–11, 2013.
 - [DMZ⁺16] Zachary DeVito, Michael Mara, Michael Zollöfer, Gilbert Bernstein, Christian Theobalt, Pat Hanrahan, Matthew Fisher, and Matthias Nießner. Opt : A domain specific language for non-linear least squares optimization in graphics and imaging. *arXiv preprint arXiv :1604.06525*, 2016.
-

- [DWMG15] Zhao Dong, Bruce Walter, Steve Marschner, and Donald P. Greenberg. Predicting appearance from measured microgeometry of metal surfaces. *ACM Trans. Graph.*, 35(1) :9 :1–9 :13, December 2015.
- [FDL10] Manuel Finckh, Holger Dammertz, and H. P A Lensch. Geometry construction from caustic images. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, volume 6315 LNCS, pages 464–477, 2010.
- [fou] Blender foundation. Blender. <https://www.blender.org/>.
- [FS07] Matthew Fisher and P Schröder. Design of tangent vector fields. *ACM Transactions on Graphics*, 2007.
- [FVH⁺13] Jiri Filip, Radom Vavra, Michal Haindl, Pavel Id, Mikulas Krupka, and Vlastimil Havran. BRDF Slices : Accurate adaptive anisotropic appearance acquisition. In *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 1468–1473, 2013.
- [GZ08] Yotam Gingold and Denis Zorin. Shading-based surface editing. *ACM Trans. Graph.*, 27(3) :95 :1–95 :9, August 2008.
- [HDKS00] Wolfgang Heidrich, Katja Daubert, Jan Kautz, and Hans-Peter Seidel. Illuminating micro geometry based on precomputed visibility. *Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '00*, pages 455–464, 2000.
- [HJEC16] Eric Heitz, Hanika Johannes, d'Eon Eugene, and Dachsbacher Carsten. Multiple-Scattering Microfacet BSDFs with the Smith Model. *Acm Siggraph*, pages 1–14, 2016.
- [Hor70] B. K.P. Horn. Shape from shading : A method for obtaining the shape of a smooth opaque object from one view. Technical report, Cambridge, MA, USA, 1970.
- [HS98] Wolfgang Heidrich and Hans-Peter Seidel. Efficient rendering of anisotropic surfaces using computer graphics hardware, 1998.
- [HSRG07] Charles Han, Bo Sun, Ravi Ramamoorthi, and Eitan Grinspun. Frequency domain normal map filtering. *ACM Transactions on Graphics*, 26(3), July 2007.
- [IM12] Piti Irawan and Steve Marschner. Specular reflection from woven cloth. *ACM Trans. Graph.*, 31(1) :11 :1–11 :20, February 2012.
- [JHY⁺14] Wenzel Jakob, Miloš Hašan, Ling-Qi Yan, Jason Lawrence, Ravi Ramamoorthi, and Steve Marschner. Discrete stochastic microfacet models. *ACM Trans. Graph.*, 33(4) :115 :1–115 :10, July 2014.

- [Kaj86] James T. Kajiya. The rendering equation. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 20(4) :143–150, August 1986.
- [KCPS13] F Knöppel, Keenan Crane, Ulrich Pinkall, and P Schröder. Globally optimal direction fields. *ACM Transactions on Graphics*, 1, 2013.
- [KEN⁺13] Thomas Kiser, Michael Eigensatz, Minh Man Nguyen, Philippe Bompas, and Mark Pauly. Architectural Caustics — Controlling Light with Geometry. *Advances in Architectural Geometry 2012*, pages 91–106, 2013.
- [KK89] J. T. Kajiya and T. L. Kay. Rendering fur with three dimensional textures. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 23(3) :271–280, July 1989.
- [LEV99] Pierre-Oscar LEVY. Le relief de l’invisible, 1999.
- [LFTG97] Eric P. F. Lafortune, Sing-Choong Foo, Kenneth E. Torrance, and Donald P. Greenberg. Non-linear approximation of reflectance functions. *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '97*, 31(3) :117–126, 1997.
- [LKK99] Rong Lu Rong Lu, J.J. Koenderink, and A.M.L. Kappers. Specularities on surfaces with tangential hairs or grooves. *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, 1, 1999.
- [LKK00] Rong Lu, Jan J Koenderink, and Astrid M L Kappers. Specularities on Surfaces with Tangential Hairs or Grooves. *Computer Vision and Image Understanding*, 1(3) :320–335, 2000.
- [LSK05] Istvan Lazanyi and Laszlo Szirmay-Kalos. Fresnel Term Approximations for Metals. In *WSCG'2005 - 13-th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision'2005*, pages 77–80, 2005.
- [Mar63] Donald W. Marquardt. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters, 1963.
- [MCT⁺05] Wan-Chun Ma, Sung-Hsiang Chao, Yu-Ting Tseng, Yung-Yu Chuang, Chun-Fa Chang, Bing-Yu Chen, and Ming Ouhyoung. Level-of-detail representation of bidirectional texture functions for real-time rendering. In *Proceedings of the 2005 Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, I3D '05*, pages 187–194, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [MDG01] S Mérillou, JM Dischler, and D Ghazanfarpour. Surface scratches : measuring, modeling and rendering. *The Visual Computer*, 2001.

- [MMS⁺05] G. Müller, J. Meseth, M. Sattler, R. Sarlette, and R. Klein. Acquisition, synthesis, and rendering of bidirectional texture functions. *Computer Graphics Forum*, 24(1) :83–109, 2005.
- [MPBM03] Wojciech Matusik, Hanspeter Pfister, Matt Brand, and Leonard McMillan. A data-driven reflectance model. *ACM Transactions on Graphics*, 22 :759, 2003.
- [MU49] Nicholas Metropolis and S Ulam. The Monte Carlo Method. *Journal of the American Statistical Association*, 44(247) :335–341, 1949.
- [NDM05] Addy Ngan, Frédo Durand, and Wojciech Matusik. Experimental analysis of BRDF models. In *Proceedings of the Eurographics Symposium on Rendering*, pages 117–126, 2005.
- [Nic65] F E Nicodemus. Directional Reflectance and Emissivity of an Opaque Surface. *Applied optics*, 4(7) :767–773, 1965.
- [OB10] Marc Olano and Dan Baker. LEAN mapping. *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games I3D 10*, 1 :181, 2010.
- [OMSI07] Makoto Okabe, Yasuyuki Matsushita, Li Shen, and Takeo Igarashi. Illumination brush : Interactive design of all-frequency lighting. In *Proceedings - Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, pages 171–180, 2007.
- [ON94] Michael Oren and Shree K. Nayar. Generalization of Lambert’s Reflectance Model. *Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH ’94*, pages 239–246, 1994.
- [Pel10] Fabio Pellacini. envyLight : an interface for editing natural illumination. In *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, volume 29, page 34, 2010.
- [PF90] Pierre Poulin and Alain Fournier. A model for anisotropic reflection. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 24(4) :273–282, September 1990.
- [Pho75] Bui Tuong Phong. Illumination for computer generated pictures. *Communications of the ACM*, 18(6) :311–317, 1975.
- [Pix] Pixologic. Zbrush. <http://pixologic.com/zbrush/features/overview/>.
- [PJJ⁺11] Marios Papas, Wojciech Jarosz, Wenzel Jakob, Szymon Rusinkiewicz, Wojciech Matusik, and Tim Weyrich. Goal-based caustics. In *Computer Graphics Forum*, volume 30, pages 503–511, 2011.
- [PK02] Sylvia C Pont and Jan J Koenderink. Bidirectional reflectance distribution function of specular surfaces with hemispherical pits.

- Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision*, 19 :2456–2466, 2002.
- [PK03] Sylvia C Pont and Jan J Koenderink. Split off-specular reflection and surface scattering from woven materials. *Applied optics*, 42 :1526–1533, 2003.
- [PL07] Fabio Pellacini and Jason Lawrence. AppWand : editing measured materials using appearance-driven optimization. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 26 :1–9, 2007.
- [PPV07] Gustavo Patow, Xavier Pueyo, and Alvar Vinacua. User-guided inverse reflector design. *Computers and Graphics (Pergamon)*, 31(3) :501–515, 2007.
- [Pra16] Steve Prachyl. Art in Brushed Metal. <http://www.steveprachyl.com/>, 2016.
- [RBG12] Boris Raymond, Pascal Barla, and Gael Guennebaud. MicroSculpt : Une approche en espace image pour la manipulation de matériaux anisotropes. In *Journées de l’Association Française d’Informatique Graphique (AFIG)*, 25èmes journées de l’Association Française d’Informatique Graphique, pages 113–118, Calais, France, November 2012. Université du Littoral Côte d’Opale et LISIC.
- [RDP05] Vincent Ross, Denis Dion, and Guy Potvin. Detailed analytical approach to the Gaussian surface bidirectional reflectance distribution function specular component applied to the sea surface. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision*, 22(11) :2442–2453, 2005.
- [RGB⁺14] Boris Raymond, Gaël Guennebaud, Pascal Barla, Romain Pacanowski, and Xavier Granier. Optimizing BRDF Orientations for the Manipulation of Anisotropic Highlights. *Computer Graphics Forum*, 33(2) :9, April 2014.
- [RGB16] Boris Raymond, Gael Guennebaud, and Pascal Barla. Multi-Scale Rendering of Scratched Materials using a Structured SV-BRDF Model. *ACM Transactions on Graphics*, July 2016.
- [ROTS09] Tobias Ritschel, Makoto Okabe, Thorsten Thormählen, and Hans-Peter Seidel. Interactive reflection editing. *ACM Trans. Graph.*, 28(5) :129 :1–129 :7, December 2009.
- [SBdDJ13] Iman Sadeghi, Oleg Bisker, Joachim de Deken, and Henrik Wann Jensen. A practical microcylinder appearance model for cloth rendering. *ACM Transactions on Graphics*, 32(2) :1–12, 2013.
- [Sch94] Christophe Schlick. An Inexpensive BRDF Model for Physically-based Rendering. *Computer Graphics Forum*, 13 :233–246, 1994.

- [Smi67] Bruce G. Smith. Geometrical Shadowing of a Random Rough Surface. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, AP-15(5) :668–671, 1967.
- [SMVP15] Thomas Subileau, Nicolas Mellado, David Vanderhaeghe, and Mathias Paulin. Light Transport Editing with Ray Portals (regular paper). In *Computer Graphics International (CGI), Strasbourg, FRANCE, 24/06/2015-26/06/2015*, page (electronic medium), <http://www.springer.com>, juin 2015. Springer Berlin / Heidelberg.
- [SNM⁺13] Thorsten-Walther Schmidt, Jan Novák, Johannes Meng, Anton S. Kaplanyan, Tim Reiner, Derek Nowrouzezahrai, and Carsten Dachsbacher. Path-space manipulation of physically-based light transport. *ACM Transactions on Graphics*, 32(4) :1, 2013.
- [tF] the Foundry. Modo. <https://www.thefoundry.co.uk/products/modo/>.
- [TLQ⁺05] Ping Tan, Stephen Lin, L Quan, B Guo, and HY Shum. Multi-resolution Reflectance Filtering. In *Proceedings of the Sixteenth Eurographics Conference on Rendering Techniques*, pages 111–116, 2005.
- [TLQ⁺08] Ping Tan, Stephen Lin, Long Quan, Baining Guo, and Heung Yeung Shum. Filtering and rendering of resolution-dependent reflectance models. In *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, volume 14, pages 412–425, 2008.
- [TS67] K. E. TORRANCE and E. M. SPARROW. Theory for Off-Specular Reflection From Roughened Surfaces, 1967.
- [VCD⁺16] Amir Vaxman, Marcel Campen, Olga Diamanti, Daniele Panozzo, David Bommes, Klaus Hildebrandt, and Mirela Ben-Chen. Directional field synthesis, design, and processing. *Computer Graphics Forum*, 2016.
- [VPB⁺09] Romain Vergne, Romain Pacanowski, Pascal Barla, Xavier Granier, and Christophe Schlick. Light warping for enhanced surface depiction. *ACM Transactions on Graphics*, 28(212) :1, 2009.
- [War92] Gregory J. Ward. Measuring and modeling anisotropic reflection. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 26(2) :265–272, July 1992.
- [WAT92] Stephen H Westin, James R Arvo, and Kenneth E Torrance. Predicting reflectance functions from complex surfaces. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 26(2) :255–264, 1992.
- [WDR11] Hongzhi Wu, Julie Dorsey, and Holly Rushmeier. Physically-based interactive bi-scale material design. *ACM Trans. Graph.*, 30(6) :145 :1–145 :10, December 2011.

- [WHON97] Tien-Tsin Wong, Pheng-Ann Heng, Siu-Hang Or, and Wai-Yin Ng. Image-based rendering with controllable illumination. In *Proceedings of the Eurographics Workshop on Rendering Techniques '97*, pages 13–22, London, UK, UK, 1997. Springer-Verlag.
- [WLKT09] Li-Yi Wei, Sylvain Lefebvre, Vivek Kwatra, and Greg Turk. State of the Art in Example-based Texture Synthesis. *Eurographics 2009, State of the Art Report, EG-STAR*, (Section 2) :93–117, 2009.
- [WMLT07] Bruce Walter, Sr Marschner, Hongsong Li, and Ke Torrance. Microfacet models for refraction through rough surfaces. *Eurographics*, pages 195–206, 2007.
- [YHJ⁺14] Ling-Qi Yan, Miloš Hašan, Wenzel Jakob, Jason Lawrence, Steve Marschner, and Ravi Ramamoorthi. Rendering glints on high-resolution normal-mapped specular surfaces. *ACM Trans. Graph.*, 33(4) :116 :1–116 :9, July 2014.
- [YHR16] Ling-Qi Yan, Steve Hašan, Miloš Marschner, and Ravi Ramamoorthi. Position-Normal Distributions for Efficient Rendering of Specular Microstructure. *ACM Trans. Graph.*, 2016.
- [YIC⁺14] Yonghao Yue, Kei Iwasaki, Bing-Yu Chen, Yoshinori Dobashi, and Tomoyuki Nishita. Poisson-Based Continuous Surface Generation for Goal-Based Caustics. *ACM Transactions on Graphics*, 33(3) :1–7, 2014.
- [ZMT06] Eugene Zhang, Konstantin Mischaikow, and Greg Turk. Vector field design on surfaces. *ACM Transactions on Graphics*, 25(4) :1294–1326, oct 2006.
- [ZTCS99] Ruo Zhang, Ping-sing Tsai, James Edwin Cryer, and Mubarak Shah. Shape-from-shading : a survey. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 21(8) :690–706, 1999.